UNIVERSIDADE DO MINHO
Escola de Engenharia

NOVAS TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS COM VISTA À SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO

Ricardo Filipe Mesquita da Silva Mateus
(Licenciado)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor Luís Bragança

Março de 2004

NOVAS TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS COM VISTA À SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO

RESUMO

A dissertação aborda o conceito de "Sustentabilidade" na vertente da construção numa lógica de desenvolvimento da Indústria da Construção, face aos desafios ambientais, sociais e económicos que se colocam às empresas do sector neste início de século.

Neste trabalho, pretende-se desmistificar o conceito "Construção Sustentável", que devido a maus exemplos do passado – que se espera não virem a ser repetidos no presente e no futuro –, ficou quase irremediavelmente associado à construção em que o único objectivo era a diminuição do impacte ambiental, e em que se relegava para segundo plano, para além de outros, parâmetros tão importantes como a qualidade, durabilidade e custo. Este conceito perdeu e continua a perder credibilidade, devido às constantes manobras de *marketing* avançadas por algumas empresas do sector, que o associam erradamente aos seus produtos, numa lógica selvagem de maximização das vendas e dos lucros

A Indústria da Construção é um dos sectores económicos mais importantes em Portugal. Este sector continua, no entanto, a basear-se excessivamente nos sistemas construtivos tradicionais e na utilização de mão-de-obra não qualificada, sendo caracterizado por uma excessiva utilização de recursos naturais e energéticos. Tal situação causa grande impacte ambiental com igual potencialidade de vir a ser minorado. Neste trabalho são identificados os impactes ambientais da construção em geral e do sector dos edifícios em particular, sendo apresentadas algumas medidas e alguns exemplos de novas tecnologias construtivas e de outras – que resultam do ressurgimento e melhoramento de tecnologias já aplicadas há milhares de anos –, cuja aplicação e desenvolvimento visam alcançar os desígnios de uma Construção cada vez mais sustentável, que assente equilibradamente nos domínios ambiental, económico e social.

No final deste trabalho, desenvolve-se uma metodologia que se espera adequada à avaliação relativa da sustentabilidade de soluções construtivas. Essa metodologia é, no final, aplicada a algumas soluções construtivas convencionais e não convencionais para pavimentos e paredes exteriores.

Espera-se que as práticas aconselhadas com vista à minoração do impacte ambiental da construção, a metodologia desenvolvida e os resultados obtidos sirvam de base aos diversos intervenientes na Construção, nas tomadas de decisão que potenciem a realização de edifícios cada vez mais sustentáveis.

NEW BUILDING TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION

ABSTRACT

This thesis embraces the “Sustainability” concept in the construction industry being the logical outcome the development of this industry that faces environmental, social and economical challenges, which enterprises have to consider in the beginning of this century.

This thesis aims at demystifying the “Sustainable Construction” concept. Due to bad examples in the past, that hopefully will not be repeated in the present and future, this concept became almost irremediably associated to construction, in which the prime objective was reducing environmental impact leaving important parameters, like quality, durability and cost behind. This concept has lost and continues to loose credibility due to constant marketing manoeuvres by companies in this sector, that deceivingly associate this concept to their products, in order to, in a fiercely manner, maximize sales and profit.

The construction industry is one of the most important economical sectors in Portugal. Nevertheless, this sector continues to base itself on traditional construction systems and unqualified workers, being characterized by excessive usage of natural and energetic resources. This situation causes great environmental impact with great potentialities to be reduced.

This thesis identifies, in general, the environmental impacts in the construction industry, and particularly, in the building sector. A few measures and examples of new construction technologies and others are also presented, that are the result of technological renewal and improvement of building technologies, some of them, already applied thousands of years ago. The development and application of these technologies aim at a construction, more and more sustainable, that settles evenly on environmental, economical and social domains.

A methodology, that is expected to be adequate to validate the sustainability of construction solutions, is presented at the end. This methodology is then applied to some conventional and non-conventional solutions of pavements and exterior walls.

It is hoped that the practices approached, the methodology developed and the results obtained, may serve as a basis for the various construction intervenients, in the decision making process, in accomplishing buildings more sustainable.

NOVAS TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS COM VISTA À SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO

PALAVRAS-CHAVE

Construção

Sustentabilidade

Tecnologia

Ambiente

Durabilidade

Funcionalidade

Economia

Sociedade

KEYWORDS

Construction

Sustainability

Functionality

Aesthetics

Environment

Economy

Society

AGRADECIMENTOS

Mostrar-me agradecido é sempre inebriante. É algo que me agrada fazer quando pretendo demonstrar a minha profunda gratidão àquelas pessoas, que despidas de segundas intenções, contribuíram para que este trabalho fosse possível. Para algumas delas, não existem adjectivos que consigam expressar convenientemente a dimensão desse sentimento.

Ao Sr. Professor Luís Bragança dirijo um especial agradecimento pela orientação e disponibilidade manifestados na elaboração desta dissertação. Os seus ensinamentos, conselhos e apurado sentido crítico em muito contribuíram para a elaboração deste trabalho.

À Sara dedico este trabalho e exprimo um profundo reconhecimento e gratidão pelo amor, carinho, incentivo, ajuda e compreensão revelados, pedras basilares para ultrapassar as dificuldades e alcançar as metas propostas. Neste ano tão importante para as nossas vidas, fica a promessa de doravante poder emprestar mais tempo à nossa felicidade.

Aos meus pais exprimo um profundo reconhecimento e gratidão pelo estímulo e interesse revelados, tónicos preciosos para a elaboração deste documento. Também não queria deixar de agradecer tudo aquilo que me proporcionaram ao longo destes anos.

Aos meus avós – que Deus quis que ainda estivessem todos vivos – quero expressar o meu agradecimento pelo seu contributo na minha formação.

A todos os amigos, professores e colegas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, o agradecimento pelo bom ambiente proporcionado e ao incentivo para o cumprimento dos objectivos aspirados.

Finalmente, o meu agradecimento a todas as pessoas com quem tenho aprendido ao longo da vida e a todos aqueles que através da sua maior ou menor colaboração tornaram possível a realização deste trabalho.

ÍNDICE

NOVAS TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS COM VISTA À SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO

PARTE II

TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS

PARTE III

ANALISE COMPARATIVA DA SUSTENTABILIDADE DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA PAVIMENTOS E PAREDES EXTERIORES

PARTE IV

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

ÍNDICE FOTOGRAFIAS

CAPITULO 4.

CAPITULO 5.

CAPITULO 6.

CAPITULO 7.

CAPITULO 8.

CAPITULO 9.

ÍNDICE QUADROS

CAPITULO 2.

CAPITULO 3.

CAPITULO 4.

CAPITULO 5.

CAPITULO 6.

CAPITULO 7.

CAPITULO 8.

CAPITULO 9.

NOVAS TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS COM VISTA À SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO

Todos podemos fazer alguma coisa, e o que fizermos agora conta mais do que em qualquer outro momento da história.

-John Elkington e Julia Hailes-

PARTE I

ENQUADRAMENTO DO TRABALHO DE INVESTIGAÇÃO NA REALIDADE DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. O IMPACTE AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTAÇÃO E OBJECTIVOS

1.1. Introdução

Desde sempre, o Homem sentiu a necessidade de satisfazer as suas necessidades básicas mais elementares. Com a imaginação, o Homem foi paulatinamente recriando um novo mundo menos agressivo ao seu bem-estar.

O Homem procurou, desde sempre, proteger-se da agressividade do meio envolvente (condições climatéricas, animais, ...,), com vista à sua sobrevivência. De início, há cerca de 4 milhões de anos, o Homem era nómada e a sua permanência num determinado local era condicionada pela abundância de alimentação espontânea e pela agressividade climática do local. Como HOMO HABILIS e depois como HOMO ERECTUS, durante 2,8 milhões de anos, aprendeu a distinguir certos seixos e a transformá-los em armas e ferramentas, a dominar e a produzir fogo e, a produzir abrigos com forma de cabanas utilizando varas de madeira e as peles dos animais que serviam para a sua alimentação. Com a descoberta do fogo, passou também a utilizar as zonas mais profundas das grutas naturais, protegendo a sua entrada com amontoados de pedras. São estes os primeiros tipos de construções de que há vestígios, tendo sido a madeira, as peles de animais e a pedra, os primeiros materiais de construção.

Mais tarde, surgem os primeiros trabalhos de barro cozido e as primeiras aldeias de casas circulares feitas de lama com palha e telhados de colmo. O aparecimento destes aglomerados

atesta que o Homem tinha aprendido a se fixar em segurança e a viver em grupos de "famílias nucleares".

Com o domínio da agricultura, o Homem procurou fixar-se nas zonas onde os terrenos eram mais férteis, passando a ser sedentário. Estava assim iniciada a civilização, que se crê ter começado na Mesopotâmia, região compreendida entre os rios Tigre e Eufrates. Nessa altura, houve a necessidade de encontrar novos tipos de abrigos, mais robustos e duradouros, evoluindo-se para a utilização de alvenarias de blocos de terra amassados e para a construção em alvenaria seca de pedra – sem materiais aglutinantes – de que ainda se encontram muitos vestígios. A construção foi assim evoluindo através da utilização e domínio de novos materiais como a pedra, a madeira, e mais tarde o ferro.

Mais tarde, foi edificando sobretudo por razões religiosas e de defesa de que são testemunhos os dólmens, alinhamentos megalíticos, as pirâmides do Egipto e da América Central, a grandiosa Muralha da China, entre outros. A construção passa a ser uma arte e uma forma de afirmação entre os povos. Havendo a necessidade de materializar construções cada vez mais grandiosas e sólidas, o Homem através da observação do comportamento dos materiais que o rodeavam aprendeu a aplicar o desenvolvimento das ciências como a física e a matemática à construção.

À medida que as exigências ao nível da resistência das construções aumentavam, mais complexos se tornavam os processos de transformação das matérias-primas a incorporar nos materiais de construção. Os materiais deixaram de ser aplicados tal e qual como eram extraídos da natureza, o que implicou, maiores consumos energéticos e maiores dificuldades na absorção destes materiais pelos ecossistemas, aquando da sua devolução, após o fim da vida útil das construções.

Nos finais do século XIX, surge um novo material de construção que aparentava ser a solução para as crescentes exigências funcionais dos materiais – economia, resistência e durabilidade. Esse material é o betão e as suas primeiras aplicações ocorreram próximo do ano de 1880, nessa altura ainda com cal hidráulica com dosagem de 350 Kg a 400 Kg por metro cúbico e em trabalhos que nada tinham a ver com a edificação. Mais tarde, passou a ser utilizado na execução de paredes maciças, utilizando a técnica das paredes de taipa, nesta altura ainda sem armadura. À medida que os anos foram passando, o Homem foi sucessivamente interpretando e optimizando as características mecânicas do betão, tendo corrigido o seu comportamento mecânico à tracção através da introdução de aço em varão. Surge assim o betão armado, o material de construção mais utilizado, hoje em dia, na construção em Portugal e que se suponha ser a solução milagrosa para todos os problemas da construção.

Com o passar dos anos, os defeitos do betão armado foram surgindo e aquele material que de início se julgava económico e eterno revelou as suas fraquezas: a sua durabilidade revelou-se limitada e muito dependente de onerosas intervenções de manutenção e reabilitação; os consumos energéticos dispendidos durante o fabrico dos materiais que o compõem – cimento e agregados – e durante as operações de demolição e de reciclagem, bem como, a elevada quantidade de recursos naturais exigidos por esta tecnologia revelaram-se incompatíveis com a escassa disponibilidade de recursos existentes na Natureza.

No final dos anos 60, início dos anos 70, começou a emergir uma forte corrente em defesa da natureza. A partir desta época, a ciência e o progresso tecnológico ficaram um pouco

desacreditados pois, passou-se a considerar essencial para o bem-estar e sobrevivência humana, a convivência em harmonia com a natureza.

Como resultado da crise do petróleo da década de 70, foi iniciada a discussão em torno da poupança de energia. Ao mesmo tempo, começa a despontar a consciência social acerca da fragilidade do Planeta Terra, e a palavra ecologia passa a ser um termo bastante utilizado. Esta discussão atingiu também a indústria da construção, primeiro ao nível da energia dispendida na fase de utilização dos edifícios e mais tarde ao nível da energia necessária à produção dos elementos construtivos. Nas últimas décadas, os elevados índices de emissões poluentes, a escassez de certos recursos naturais e os desequilíbrios daí resultantes mantiveram a discussão na ordem do dia.

Nos países mais desenvolvidos, as preocupações ambientais e ecológicas revelaram que certos materiais e tecnologias construtivas utilizados, como por exemplo, o betão armado, causam grandes assimetrias no meio ambiente pois, a quantidade de recursos naturais necessários a estas tecnologias e a uma indústria da construção em crescimento exponencial, não é compatível com a capacidade de auto-regeneração desses recursos.

Com a evolução da investigação cientifica, assistiu-se ao aparecimento de novas tecnologias construtivas mais compatíveis com o equilíbrio ambiental, e ao ressurgimento de certas tecnologias utilizadas já há muitos milhares de anos e que tinham sido abandonadas na maior parte do globo, como por exemplo, a taipa e o adobe.

Neste trabalho vai-se abordar a temática da sustentabilidade da construção face às expectativas negativas existentes ao nível do desequilíbrio ambiental e aos desafios que se colocam às empresas da construção e aos restantes intervenientes do sector, que deverão assumir os desafios ambientais não como uma obrigação – de modo a serem cumpridos os escassos regulamentos existentes sobre esta matéria –, mas como uma estratégia de afirmação num mercado da construção cada vez mais competitivo.

1.2. Objectivos da dissertação

Com este trabalho pretende-se reunir alguns exemplos de soluções construtivas não convencionais que surgiram da procura de soluções mais sustentáveis para a Construção.

Algumas dessas soluções não serão adequadas às realidades técnico-económica e climática de Portugal, importando, por isso, seleccionar aquelas que numa primeira abordagem possuam maiores potencialidades de virem a ser implementadas na indústria da construção nacional.

Essas soluções serão analisadas através da integração das suas valências técnica, funcional e económica, bem como do respectivo impacte ambiental, de modo a serem avaliadas as suas potencialidades e inconvenientes relativamente às soluções construtivas tradicionalmente utilizadas em Portugal.

Não será abordada a globalidade da Construção, mas sim o sector dos edifícios, dando-se especial ênfase ao sector da habitação que, por possuir um elevado peso no mercado da

construção nacional, é aquele que acarreta mais impacte sobre o ambiente, sociedade e economia.

Pretende-se também, desenvolver uma metodologia adequada à análise da sustentabilidade de soluções construtivas, que será no final aplicada a algumas soluções construtivas convencionais e não convencionais, a fim de verificar quais as vantagens e inconvenientes de cada solução construtiva.

Em suma, os objectivos concretos deste trabalho são:

- Abordar a temática da construção segundo o vector do impacte ambiental, reunindo o maior número de dados acerca dos efeitos perniciosos da construção sobre o ambiente;
- Reunir exemplos de soluções que permitam mitigar o impacte ambiental dos edifícios.
- Levantar alguns exemplos de soluções construtivas potencialmente mais sustentáveis, que se encontram a ser desenvolvidas e/ou implementadas no sector dos edifícios de habitação;
- Desenvolver uma metodologia adequada à análise da sustentabilidade de soluções construtivas.
- Aplicar essa metodologia a algumas soluções construtivas convencionais e não convencionais.

1.3. Organização da dissertação

A apresentação e desenvolvimento dos diversos temas encontram-se organizados em quatro partes, que integram dez capítulos, nos quais são abordados os seguintes assuntos.

Na primeira parte, composta por três capítulos, é efectuado o enquadramento da dissertação. No primeiro capítulo realiza-se a introdução ao tema, enumeram-se os objectivos preconizados e a metodologia adoptada para a dissertação. No segundo capítulo é feita uma abordagem à evolução histórica do conceito "Construção Sustentável", sendo explicados os motivos que levaram à sua génese e que consubstanciam a sua crescente importância. Nesse capítulo são definidos e desmistificados os conceitos de "Desenvolvimento Sustentável" e de "Construção Sustentável". Tendo em conta que a sustentabilidade se tem vindo a afirmar como uma mais-valia num sector cada vez mais competitivo, a "Construção Sustentável" é anunciada como um desafio importante para os diversos intervenientes no sector. Neste capítulo é ainda apresentada uma lista que resume as prioridades que deverão ser consideradas na fase de projecto para que se assegure a sustentabilidade dos edifícios durante todo o seu ciclo de vida. No terceiro capítulo são apresentados alguns dados acerca do impacte ambiental da Construção, nomeadamente do sector dos edifícios, sendo identificados os principais recursos e produtos directa e indirectamente associados. Para cada um dos recursos e produtos, são enumeradas algumas soluções que

potenciam a diminuição desse impacte. Neste capítulo, dá-se especial ênfase à compatibilização dos edifícios com as condições climáticas particulares do local de implantação – edifícios bioclimáticos –, e aos regulamentos energéticos existentes sobre a matéria.

Na parte seguinte – Parte II –, composta por três capítulos, apresentam-se alguns sistemas de construção e soluções construtivas não convencionais, que são considerados mais sustentáveis do que as convencionais, bem como as dificuldades adjacentes à sua implementação. No quarto capítulo são abordados os aspectos que importa considerar na selecção dos sistemas construtivos para os edifícios, bem como as razões para o atraso relativo da Indústria da Construção em relação às demais indústrias. São também apresentadas as evoluções expectáveis para a indústria da construção, no domínio dos materiais, produtos e processos, assim como as barreiras adjacentes. No quinto capítulo abordam-se alguns sistemas construtivos não convencionais, alguns dos quais resultantes da evolução de soluções utilizadas há milhares de anos, que são considerados mais sustentáveis do que os sistemas convencionais. Neste capítulo serão abordados os seguintes sistemas construtivos: sistemas construtivos em terra – a taipa, o adobe e o “BTC” –; em estruturas metálicas leves (LGSF - *Light Gauge Steel Framing*); e em betão celular autoclavado – ACC. Para cada sistema construtivo são discutidas as características técnico-funcionais, e as mais-valias e reservas, relativamente ao sistema convencional. No capítulo seguinte, tendo presente a influência da envolvente vertical dos edifícios no consumo de energia convencional, abordam-se duas soluções não convencionais para as paredes exteriores: parede de Trombe e fachada ventilada.

Na parte III, composta por três capítulos, será realizada uma análise comparativa da sustentabilidade de soluções construtivas para pavimentos e paredes exteriores. No capítulo 7 são apresentados os sistemas e ferramentas mais relevantes de avaliação da sustentabilidade de edifícios. Como os sistemas e ferramentas de avaliação existentes estão sobretudo orientados para a análise global da sustentabilidade dos edifícios é desenvolvida, neste capítulo, uma metodologia adequada à análise da sustentabilidade de soluções construtivas. No capítulo 8, a metodologia desenvolvida é aplicada a cinco tecnologias construtivas de pavimentos e no capítulo 9, é aplicada a seis tecnologias construtivas de paredes. No final dos capítulos 8 e 9 são discutidos os resultados obtidos e é apresentado um quadro que resume as características técnico-funcionais mais importantes das soluções construtivas para pavimentos e paredes exteriores, respectivamente.

Por fim, na parte IV, são apresentadas as perspectivas futuras, conclusões e pistas para a acção no domínio da problemática da sustententabilidade.

CAPÍTULO 2

A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

2.1. Enquadramento

O objectivo da indústria da construção é a realização de um produto que satisfaça a **funcionalidade** requerida pelo dono da obra, com as necessárias condições de **segurança** para o efeito das acções tanto naturais como humanas e com características de **durabilidade** que permitam a redução da deterioração ao longo do seu ciclo de vida. O produto deve ainda ser compatível com os **interesses económicos** do Dono de Obra, ser **esteticamente agradável** e compatível com a sua envolvente, e traduzir o menor **impacte ambiental** possível (fig. 2.1). Só com o equilíbrio entre estes seis vectores, que deverá ser alcançado utilizando o bom senso e os conhecimentos tecnológicos dos diversos intervenientes da construção, se conseguirão realizar construções que sejam efectivamente compatíveis com as necessidades humanas do presente e do futuro.

De todos estes seis vectores, aquele que indubitavelmente ocupa primordial importância no mercado da construção nacional é o económico, sendo lamentavelmente menosprezados os vectores da durabilidade e do impacte ambiental. A indústria da construção, com a configuração actual, apresenta uma grande quota-parte na responsabilidade da degradação do meio ambiente. No entanto, atendendo ao atraso tecnológico desta indústria, esta apresenta grandes potencialidades ao nível da redução do seu impacte ambiental. A introdução de novas tecnologias que permitam aumentar a compatibilização deste sector com os desígnios do desenvolvimento sustentável, é um dos caminhos a seguir.

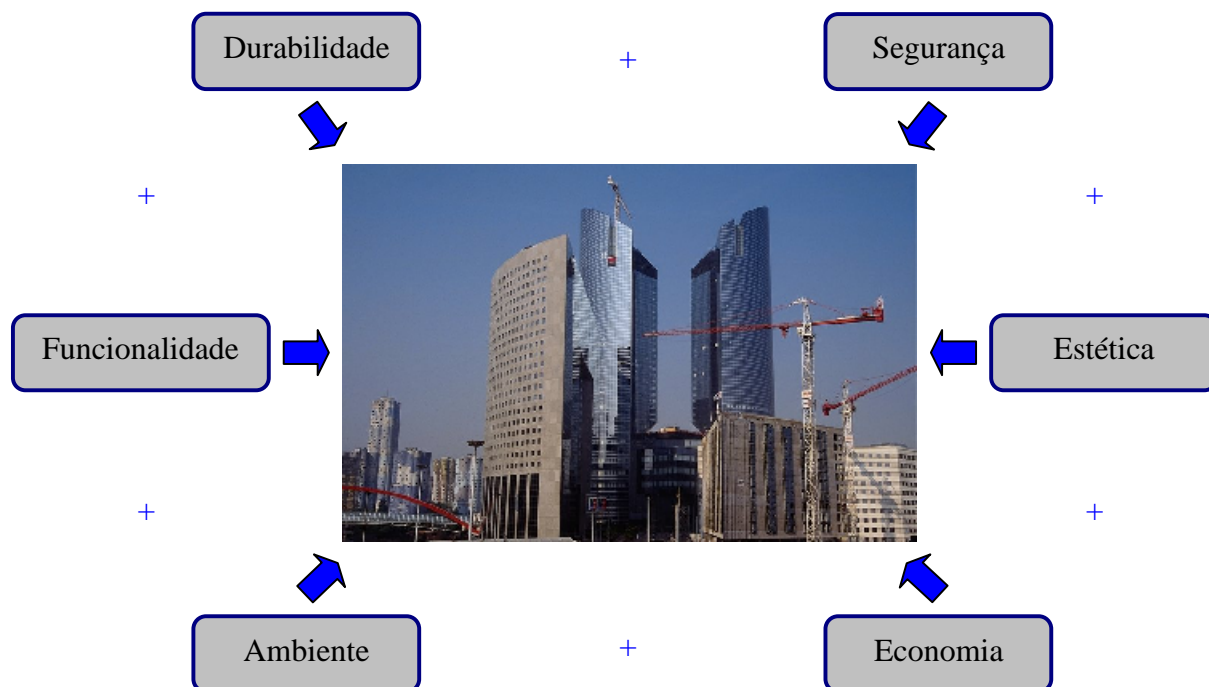



Figura 2.1 – Objectivos das obras da indústria da construção

2.2. O desenvolvimento sustentável

A temática do desenvolvimento sustentável começou a aflorar na segunda metade do século XX, quando o Homem começou a ter consciência da progressiva degradação infligida pelas suas políticas de desenvolvimento ao meio ambiente. Constatou-se que em resultado das suas cruéis actividades destrutivas, a biodiversidade na Terra está a diminuir a um ritmo de cerca de 50.000 espécies por ano (Brown, 1991) e que ao nível dos recursos inorgânicos, estes não eram infinitamente inesgotáveis, pelo que não era possível continuar a basear os sistemas energéticos em fontes não renováveis, nem manter a actual política existente no destino a dar aos resíduos produzidos pela actividade humana. Se por um lado, o consumo de recursos naturais tem aumentando exponencialmente devido a uma sociedade cada vez mais numerosa, que cresce a um ritmo de 250.000 pessoas por dia, cada vez mais tecnologicamente desenvolvida e em que os padrões de conforto são cada mais exigentes, por outro, a quantidade disponível de recursos apresenta um comportamento inverso (fig. 2.2)

Crescimento da população, consumo de combustíveis fosseis, consumo de outros recursos, produção industrial, agricultura, desertificação, salinização, contaminação, despesas militares, assimetrias regionais, nível de conforto exigido, desenvolvimento tecnológico.

Redução das áreas florestais, *stocks* de pesca, terrenos agrícolas, terra vegetal, habitates, espécies, biodiversidade, fontes de energia não renovável.

Figura 2.2 – Ritmos de alteração no planeta (adaptado de Yeang, 2001)

O amplo número de actividades do ser humano sobre a Terra, sobrecarregará com o tempo a elasticidade – ou capacidade de assimilação – de outras espécies e dos sistemas naturais do planeta, conduzindo inevitavelmente à devastação total do meio natural e, por conseguinte, à degradação do próprio meio construído. Estima-se, atendendo ao ritmo de crescimento actual, que as provisões de recursos energéticos não renováveis na biosfera só estarão disponíveis por mais cerca de cinquenta anos (Von Weizsacker *et al*, 1997).

A definição do conceito "desenvolvimento sustentável" tem sido amplamente discutida e sofrido algumas mutações ao longo do tempo. Este conceito foi enfatizado no Relatório Brundtland (World Commission on Environment and Development, 1987), onde foi definido da seguinte forma:

> "Por desenvolvimento sustentável entende-se o desenvolvimento que satisfaz as necessidades actuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras para satisfazerem as suas próprias necessidades."

Embora esta definição tenha sido vaga, trouxe consigo uma mensagem bastante positiva e simples, propondo a busca de um equilíbrio entre os níveis de desenvolvimento e a quantidade existente de recursos naturais de modo a que, o desenvolvimento ocorresse num patamar que pode ser mantido sem prejudicar o ambiente natural ou as gerações futuras. Este relatório consolidou a ideia de que era necessário um esforço comum e planetário para que o rumo do modelo de desenvolvimento económico fosse corrigido.

Outras definições foram surgindo, como a definição da União Mundial da Conservação, do Programa das Nações Unidas para o Ambiente e do Fundo Mundial para a Natureza (1991), que se considera complementar da primeira:

> "Desenvolvimento sustentável significa melhorar a qualidade de vida sem ultrapassar a capacidade de carga dos ecossistemas de suporte"

Em Junho de 1992, a Organização das Nações Unidas (ONU), realizou na cidade do Rio de Janeiro a Conferência Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano, com a participação de 170 países. Nessa conferência, foi lavrado um documento denominado por "Agenda 21", contendo recomendações e referências específicas sobre como alcançar um desenvolvimento sustentável, que deveriam ser implementadas até ao início do século 21, pelos Governos, Agências de Desenvolvimento e Grupos Sectoriais, em todas as áreas onde a actividade humana afectasse o Meio Ambiente. Este documento, consistia numa proposta de estratégia destinada a subsidiar um planeamento estratégico e que deveria ser adaptado no espaço e no tempo às características peculiares de cada país. A "Agenda 21", ao mesmo tempo que criticava o modelo de desenvolvimento vigente na altura, considerando-o socialmente injusto e perdulário do ponto de vista ambiental, proponha uma nova sociedade, justa e ecologicamente responsável e que fosse ao mesmo tempo produtora e produto do desenvolvimento sustentável.

O desenvolvimento sustentável é, pois, um conceito muito mais lato do que o de protecção do ambiente. Implica a preocupação pelas gerações futuras e a manutenção ou melhoria da salubridade e integridade do ambiente a longo prazo. Inclui as preocupações com a qualidade de vida – e não só o crescimento económico –, a equidade entre pessoas no presente – incluindo a prevenção da pobreza –, a equidade entre as gerações – as gerações do futuro merecem um ambiente pelo menos tão bom como aquele que usufruímos actualmente, se não melhor –, e preocupações com as problemáticas sociais, sanitárias e éticas do bem-estar humano. Implica, ainda, que só deverá haver um maior desenvolvimento se este se situar dentro dos limites necessários ao equilíbrio dos sistemas naturais e artificiais. Com o desenvolvimento sustentável, pretende-se basicamente que as actividades para a realização das aspirações por desenvolvimento sejam projectadas com vista a minimizarem o uso de recursos ao longo do tempo. Em suma, o desenvolvimento sustentável propõe-se a nada menos que ao resgate de uma racionalização completa, procurando equilibrar as diferenças a nível social – através da justiça social –, económico – através da eficiência económica –, e ecológico – através da prudência ecológica (Brüsecke, 1996).

O desenvolvimento sustentável apresenta assim três dimensões: **económica**, **social** e **ambiental**. O modelo de desenvolvimento sustentável deve estimular e salvaguardar a convivência harmoniosa e o equilíbrio entre estas três dimensões.

Actualmente, a dimensão que apresenta maior desenvolvimento é a económica, relegando-se para segundo plano a dimensão social, sendo praticamente nulo o desenvolvimento ao nível da dimensão ambiental. Esta assimetria, na maneira como Homem encara cada uma destas três dimensões, coloca seriamente em risco, a curto prazo, a sobrevivência das gerações futuras (fig. 2.3).

Figura 2.3 – Pilares do desenvolvimento sustentável (adaptado de Hannequart, 2002)

A interligação da indústria da construção com as três dimensões da sustentabilidade é particularmente importante, pois para além desta indústria apresentar uma considerável participação no PIB – dimensão económica – e de ser responsável por uma expressiva parcela na geração de postos de trabalho – dimensão social –, utiliza recursos naturais e a sua actividade está intimamente relacionada com o meio ambiente – dimensão ambiental –, na medida em que modifica o ambiente natural através das suas intervenções – redes viárias, barragens, edifícios, etc.

> A construção de uma sociedade alicerçada nos princípios do desenvolvimento sustentável exige novos compromissos de todos. Cabe a cada um, do cidadão ao Estado, conhecer e compreender essas premissas, assumindo a responsabilidade de alinhar as suas condutas presentes e futuras com as mesmas.

2.3. A construção sustentável

O desenvolvimento sustentável não é apenas uma bandeira dos ecologistas e já se constitui como uma preocupação real para a indústria da construção, quer a nível nacional como internacional. A indústria da construção devido à grande quantidade de recursos que consume, à quantidade de resíduos que produz, à sua implicação na economia dos países e à sua inter-relação com a sociedade, não ficou alienada dos objectivos e metas que regem o desenvolvimento sustentável.

O conceito de construção sustentável não é recente, pois existem indícios documentados, que remontam à Antiguidade Clássica, onde se referem as ligações entre os meios natural e artificial. Este conceito foi abordado pelo arquitecto e engenheiro romano Vitrúvio (séc. I a. C.), no seu tratado de arquitectura, através de certas recomendações acerca de temas como a localização, orientação e iluminação natural dos edifícios.

Nos finais do século XVIII, com o início da Revolução Industrial em Inglaterra, assistiu-se à migração de pessoas das zonas rurais para as cidades mais industrializadas, na tentativa de encontrarem melhores empregos e condições salariais. Nesta altura, o número de pessoas nos centros urbanos aumentou desmesuradamente e as cidades expandiram-se rapidamente e sem qualquer ordenamento. O rápido crescimento destas cidades não foi acompanhado por igual crescimento das infraestruturas e por um correcto planeamento e desenho urbano, pelo que as condições que estas proporcionavam eram de extrema insalubridade. A corrente de pensamento de índole sanitária que daí adveio traria consigo as sementes de um novo conceito, o da relação do ambiente construído com o meio ambiente.

Só muito mais tarde, dois séculos depois, na conferência do Rio de Janeiro (Rio-92) é que ganhou ênfase o conceito de "construção sustentável", o qual visava o aumento de oportunidades às gerações futuras, através de uma nova estratégia ambiental direccionada à produção de construções melhor adaptadas ao meio ambiente e à exigência dos seus utilizadores. Nesta conferência, foram definidas as orientações para as estratégias locais e nacionais a aplicar na construção. Um dos aspectos particulares enfatizado neste contexto foi que se por um lado se assistia ao crescimento exponencial do consumo energético no sector dos edifícios, por outro continuava-se a assistir à falta de adequação da arquitectura ou do projecto dos edifícios e do desenho e planeamento urbano às condições climáticas locais.

O termo "construção sustentável" foi proposto pela primeira vez pelo professor Kibbert (1994) para descrever as responsabilidades da indústria da construção no que respeita ao conceito e aos objectivos da sustentabilidade. De acordo com Kibbert, o conhecimento existente e o diagnóstico à indústria da construção em termos de impactes ambientais revelam que, existe a necessidade de uma mudança para se atingirem os objectivos de sustentabilidade. Como primeira prioridade dever-se-á referir a necessidade de se analisarem as características da construção tradicional e compará-la com o novo critério sustentável para os materiais de construção, os produtos e os processos de construção.

Esta linha de pensamento viria a alterar os factores tradicionalmente considerados competitivos na indústria da construção: a **qualidade**, o **tempo** e o **custo** (fig. 2.4).

Tradicionalmente, uma construção só era competitiva se tivesse o nível de qualidade exigido pelo projecto, se utilizasse sistemas construtivos que optimizassem a produtividade durante a fase de construção e que, por conseguinte, conduzisse à diminuição do período de construção, permitindo uma maior rapidez na recuperação de investimento. Tudo isto, sem alterar significativamente os custos da construção.

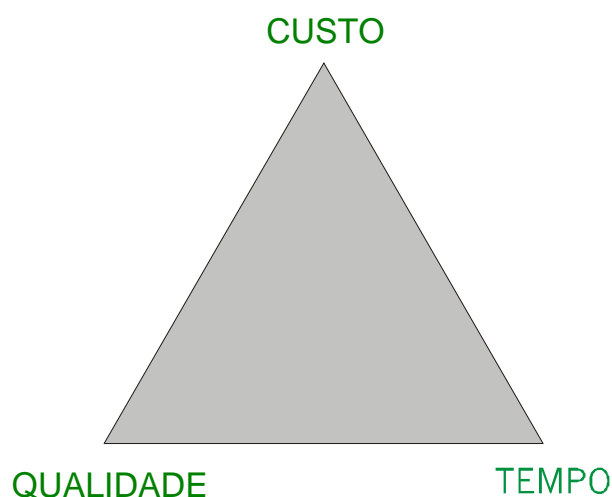



Figura 2.4 – Aspectos competitivos na construção tradicional

Mais tarde, com a introdução das preocupações ambientais, o conceito de qualidade na construção passou a abranger os aspectos relacionados com a qualidade ambiental. Surge assim a construção eco-eficiente, também conhecida por construção ecológica ou por construção "verde". A construção eco-eficiente traduz-se em construir com impacte ambiental mínimo, e se possível, construir para conseguir o efeito oposto, isto é, criar edifícios com consequências reparadoras para o meio ambiente, por exemplo, através da substituição de edifícios ou de outro tipo de construções, por outros com efeitos menos perniciosos sobre o meio ambiente. Em suma, com a construção eco-eficiente, pretende-se que o meio construído se integre em todos os aspectos dos sistemas ecológicos (ecossistemas) da biosfera durante todo o seu ciclo de vida (fig. 2.5).

O conceito de construção eco-eficiente tem sido muitas vezes associado à mera diminuição dos consumos energéticos nos edifícios, sendo por isso confundido com o conceito de arquitectura bioclimática. Como se pode observar no quadro 2.1, o conceito de construção eco-eficiente é no entanto mais abrangente, por incluir preocupações ao nível da redução da delapidação dos recursos naturais, da produção de resíduos e emissão de gases poluentes nocivos aos ecossistemas e à saúde humana, e ao nível da conservação da biodiversidade.

Quadro 2.1 – Tipos de construção (convencional, bioclimática e eco-eficiente) (Fonte: Yeang, 2001)

Aspectos	Tipos de construção		
	Convencional	**Bioclimática**	**Eco-eficiente**
Configuração do edifício	Outras influências	Influenciada pelo clima	Influenciada pelo meio ambiente
Orientação do edifício	Pouco importante	Crucial	Crucial
Fachadas e janelas	Outras influências	Dependentes do clima	Dependentes do meio ambiente
Fonte de energia	Gerada	Gerada/ambiente	Gerada/ambiente/local
Controlo do ambiente interno	Electromecânico (artificial)	Electromecânico/ natural	Electromecânico/natural
Consumo de energia	Geralmente elevado	Reduzido	Reduzido
Fontes de matérias-primas	Pouco importante	Pouco importante	Reduzido impacte ambiental
Tipo de materiais	Pouco importante	Pouco importante	Reutilizáveis/recicláveis/ reciclados

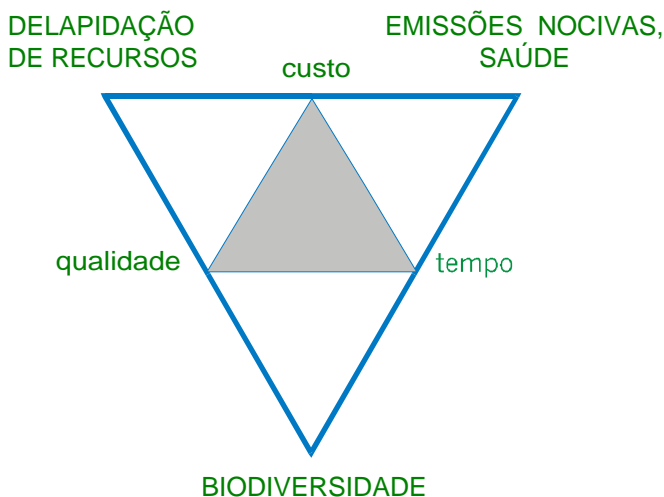



Figura 2.5 – Construção eco-eficiente

Integrando os princípios da eco-eficiência com as condicionantes económicas, a equidade social e o legado cultural (introduzindo um novo aspecto ao nível do conceito “tempo”), estamos na presença das três dimensões da construção sustentável (fig. 2.6).

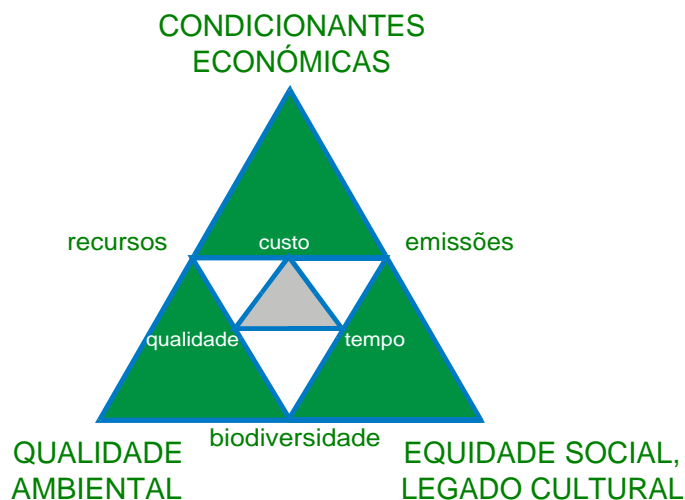



Figura 2.6 – Construção sustentável

Nesta óptica, é possível apresentar uma lista de prioridades que podem ser consideradas os pilares da construção sustentável:

(i) **Economizar energia e água.** Os edifícios devem ser concebidos de modo a se assegurar uma gestão eficiente dos consumos energéticos e de água. A energia eléctrica resulta principalmente da combustão de combustíveis fósseis. O processo produtivo de energia eléctrica apresenta elevado impacte ambiental devido à grande quantidade de gases poluentes emitidos e ao facto de utilizar como matéria-prima um recurso natural limitado e não renovável, pelo que se deverá reduzir ao máximo o seu consumo. O uso contínuo de energia constitui provavelmente o maior impacte ambiental dos edifícios, pelo que deve constituir a prioridade principal. Este ponto está relacionado com muitos aspectos, que vão desde a minimização dos consumos energéticos durante a fase de construção (adoptando sistemas de construção simples), até à redução dos consumos energéticos durante a fase de utilização através da utilização de fontes de energia renováveis, minimização dos consumos durante as estações de arrefecimento (Verão) e aquecimento (Inverno) e a optimização da iluminação e ventilação natural. O consumo de água nos edifícios está directamente relacionado com a produção de águas residuais pelo que importa assegurar uma gestão adequada deste bem precioso e cada vez mais escasso, através da introdução, por exemplo, de autoclismos com sistemas de descarga diferenciados, bases de chuveiros em detrimento de banheiras, torneiras monocomando, torneiras com temporizador e de descarga automática, entre outros.

(ii) **Assegurar a salubridade dos edifícios**. Salvaguardando o conforto ambiental no seu interior, através da introdução e maximização da iluminação e ventilação natural, onde for possível. São de evitar os compartimentos que não possuam aberturas directas para o exterior do edifício.

(iii) **Maximizar a durabilidade dos edifícios**. Actualmente projecta-se para a resistência e não para a durabilidade. Urge mudar esta situação, pois com pequenos investimentos nas fases de concepção e construção é possível ampliar bastante o ciclo de vida dos edifícios. Para tal, devem ser utilizadas tecnologias construtivas e materiais de construção que sejam duráveis, e as construções devem ser flexíveis de modo a permitirem o seu ajuste a novas utilizações. Quanto maior for o ciclo de vida de um edifício, maior vai ser o período de tempo, durante o qual, os impactes ambientais produzidos durante a fase de construção serão amortizados.

(iv) **Planear a conservação e a manutenção dos edifícios**. Actualmente, esquece-se que após a construção, um edifício deve ser objecto de alguns investimentos periódicos que salvaguardem a sua conservação. Os edifícios possuem uma vida útil limitada e seguem um processo de envelhecimento desde a sua construção até à sua reabilitação e demolição. Inevitavelmente, com o passar dos anos, os edifícios tendem a deteriorar-se, através das acções físicas, químicas e mecânicas a que estão submetidos, chegando a atingir um estado de degradação que não é compatível com o conforto e a segurança estrutural previstos durante a fase de projecto, podendo mesmo em casos extremos verificar-se a sua ruína total ou parcial. Os edifícios comportam uma grande quantidade de recursos naturais e culturais que importam ser preservados, fazendo parte integrante da identidade do local onde estão implantados. Assim, os edifícios tem que ser vistos como um recurso valioso e não como algo que se usa e se deita fora. As intervenções de manutenção e reabilitação permitem a dilatação do ciclo de vida das construções, com todas as vantagens enunciadas no ponto anterior.

(v) **Utilizar materiais eco-eficientes**. Os materiais eco-eficientes, ou ecológicos são todos os materiais que durante o ciclo de vida, desde a fase de extracção até à devolução ao meio ambiente, possuem um baixo impacte ambiental. São considerados materiais eco-eficientes os materiais que cumpram os seguintes requisitos:

- **Não possuir químicos nocivos à camada de ozono** (como, por exemplo, CFCs e HCFCs). Deve ser evitada a utilização de espumas isolantes em que se utiliza como gases expansivos os HCFCs, como por exemplo, o poliestireno expandido (EPS), o poliestireno expandido extrudido (XPS) e a espuma rígida de poliuretano (PUR);

- **Ser durável**. Como os consumos energéticos durante a fase de processamento dos materiais são elevados, um material que seja durável ou que requeira uma menor manutenção, contribui geralmente para a poupança energética. Materiais mais duráveis também contribuem para a diminuição dos problemas relacionados com a produção de resíduos sólidos;

- **Exigir poucas operações de manutenção**. Sempre que possível, deve-se escolher materiais que exigiam poucas operações de manutenção (tintas, materiais impermeabilizantes, etc.), ou aqueles cuja manutenção implique um baixo impacte ambiental;

- **Incorporar baixa energia primária (PEC – *Primary Energy Consumption*)**. A energia primária dos materiais resulta do somatório da energia consumida durante a extracção das matérias-primas, seu transporte para as unidades de processamento e no seu processamento. Quanto mais elaborado for o processamento maior será a energia primária. Sempre que a durabilidade dos materiais não seja comprometida e as reservas de matérias-primas o permitam, devem ser utilizados materiais com baixa energia primária, como por exemplo, a madeira;

- **Estar disponível nas proximidades do local de construção**. O transporte dos materiais de construção implica custos económicos e ambientais (utilização de energia e emissão de gases poluentes). Deve-se preferir a utilização de materiais produzidos na região;

- **Ser elaborado a partir de matérias recicladas e/ou que possuam grandes potencialidades para virem a ser recicladas ou reutilizadas**. Os materiais de construção realizados a partir de matérias recicladas participam na mitigação dos problemas relacionados com os resíduos sólidos, diminuição dos consumos energéticos na fase de transformação, e contribuem para a preservação dos recursos naturais;

(vi) **Apresentar baixa massa de construção**. Quanto menor for a massa total do edifício menor será a quantidade de recursos naturais incorporada. Uma das soluções que pode substancialmente contribuir para uma construção mais racional será a introdução de tecnologias construtivas que permitam reduzir o peso das construções. Esta redução pode ser conseguida através da utilização de uma solução construtiva leve na envolvente vertical dos edifícios, com elevado desempenho térmico e acústico e da utilização pontual no seu interior de materiais de elevada massa, que desempenhem conjuntamente funções estruturais e de armazenamento térmico. A título de exemplo, o desenvolvimento de sistemas construtivos baseados numa estrutura de perfis metálicos leves (LGSF - *Light Gauge Steel Framing*) resultou da necessidade de se aumentar a racionalização da quantidade de matéria-prima a incorporar nas construções, consistindo numa evolução lógica dos sistemas de construção tradicional em betão armado.

(vii) **Minimizar a produção de resíduos**. Os resíduos da construção provêm das mais diversas fontes: produção dos materiais, perdas durante o seu armazenamento, transporte, construção, manutenção e demolição. É na fase de construção que se produzem uma grande parte dos resíduos provenientes da indústria da construção. Durante as fases de transporte e construção poder-se-á diminuir a produção de resíduos através de um correcto acondicionamento e armazenagem dos materiais de construção. A diminuição da produção de resíduos na fase de construção pode ser conseguida através da maximização da utilização de sistemas pré-fabricados, que só pode ser conseguida através da utilização dimensões padrão na fase de concepção.

(viii) **Ser económica**. Uma construção só pode ser sustentável se depois de integrados os princípios enunciados nos pontos anteriores se consiga compatibilizar o seu custo

com os interesses do dono de obra e dos potenciais utilizadores. A construção sustentável não pode competir com a construção tradicional se o seu custo for substancialmente superior. A análise económica de um sistema de construção deve ser efectuada durante as diversas fases do seu ciclo de vida: construção, utilização, manutenção e reabilitação, e demolição. O aumento da produtividade durante a fase de construção, através da utilização de sistemas construtivos simples, padronizados e que exijam uma menor carga de mão de mão-de-obra, é um aspecto a considerar com vista à racionalização económica desta fase. Por outro lado, a diminuição do período de construção, constitui um factor económico importante pois, permite maior rapidez no retorno do investimento inicial. Durante a fase de utilização, devem ser considerados os benefícios económicos resultantes da melhor racionalização energética, de consumo de água, e na maior durabilidade dos materiais, com a consequente redução dos custos de manutenção. A análise económica de um sistema construtivo não fica completa se não for considerado o valor residual das construções, isto é, o valor no final da sua vida útil, que depende da possibilidade dos seus materiais e componentes virem a ser reutilizados ou reciclados. Importa aqui salientar, que o conceito de construção económica não é sinónimo de construção barata.

(ix) **Garantir condições dignas de higiene e segurança nos trabalhos de construção**. Deve-se realizar uma escolha criteriosa dos materiais, produtos, sistemas construtivos e processos de construção, de modo a melhorar as condições de trabalho dos trabalhadores e a potenciar a diminuição dos riscos de acidente, em cada uma das fases do ciclo de vida de uma construção.

Com a construção sustentável, pretende-se a satisfação das necessidades da geração presente sem pôr em perigo a possibilidade das gerações futuras satisfazerem também as suas necessidades.

Esta lista de prioridades deverá ser aplicada, através de uma abordagem integrada, a todas as fases que compõem o ciclo de vida de uma construção: projecto, construção, operação/manutenção e demolição/deposição (fig. 2.7).

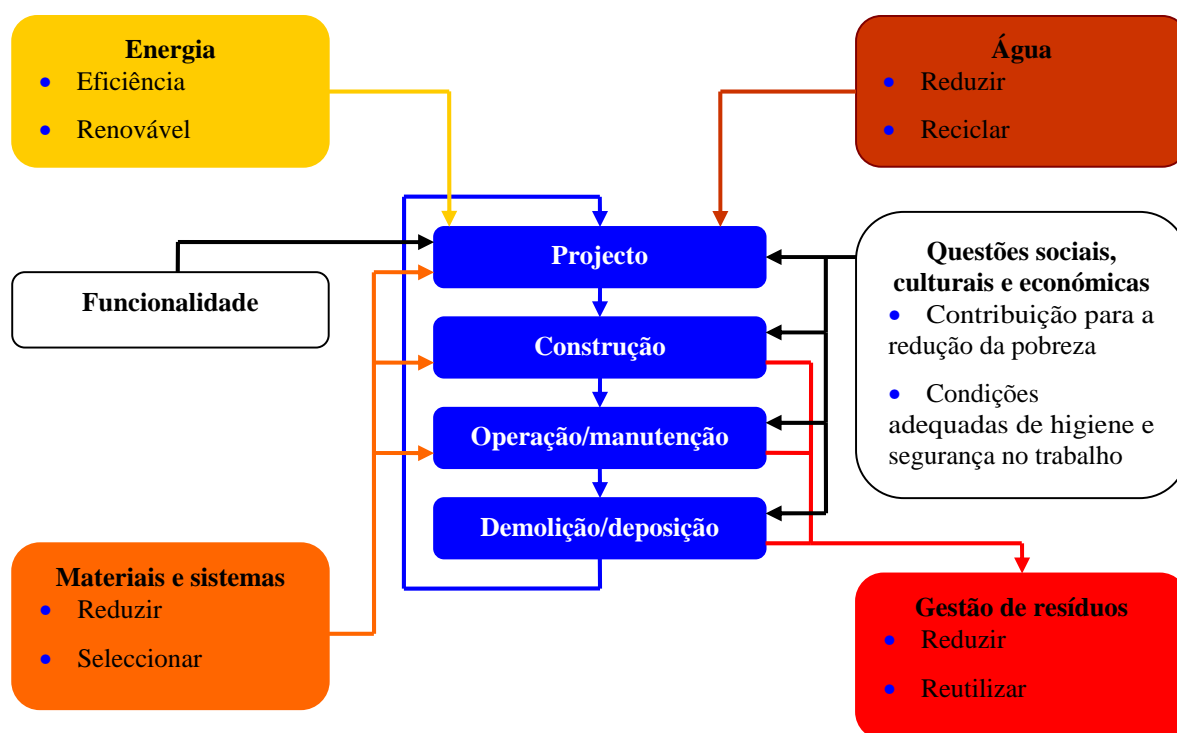



Figura 2.7 – Abordagem integrada e sustentável às fases do ciclo de vida de uma construção

CAPÍTULO 3

O IMPACTE AMBIENTAL DOS EDIFÍCIOS

3.1. Introdução

O ambiente construído (artificial) é um sistema integrado no meio ambiente (natural), existindo uma relação de interdependência entre os dois ambientes. A subsistência do ambiente artificial só é garantida através da integração de vários recursos provenientes do meio ambiente, e posterior devolução de alguns produtos. Estas interacções entre os ambientes natural e construído designam-se por impacte ambiental. Quanto menores forem as interacções entre os dois ambientes, menor será impacte ambiental produzido pelo ambiente construído. Com a procura da sustentabilidade ambiental da construção, visa-se a diminuição do impacte ambiental deste sector, através da diminuição das suas interacções com o ambiente natural. A interacção entre os dois ambientes é diminuída na mesma razão em que se diminui a quantidade de recursos consumidos e de resíduos produzidos, pelo ambiente construído.

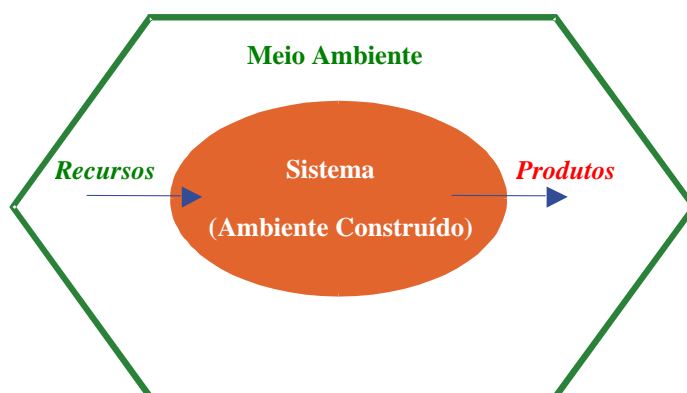



Figura 3.1 – Interacção entre os ambientes construído e natural

Em Portugal, a cadeia produtiva da construção civil é um dos sectores económicos mais importantes, continuando, no entanto, a basear-se excessivamente nos sistemas construtivos convencionais e na utilização de mão-de-obra não qualificada, sendo caracterizada por uma excessiva utilização de recursos naturais e energéticos e pela excessiva produção de resíduos. Deste modo, a construção possui efeitos reais e potenciais sobre o meio ambiente.

A indústria da construção em geral e o sector dos edifícios em particular, contribuem expressivamente para a degradação ambiental. Os edifícios, durante o seu ciclo de vida, que se desenvolve desde a fase de construção até à fase de desmantelamento/demolição, passando pelas fases de utilização, manutenção e reabilitação, provocam inúmeros impactes ambientais que importa conhecer, com vista a potenciar o desenvolvimento de novas tecnologias com vista à promoção sustentabilidade da construção.

Com o crescimento da população mundial, tem-se assistido à crescente procura de edifícios de habitação, com o consequente aumento na procura de recursos e produção de resíduos (produtos). São vários os impactes ambientais dos edifícios que contribuem para as alterações climáticas e interferem nos habitats animal e vegetal, podendo ser classificados em três categorias:

- Problemas relacionados com os consumos energéticos, como as **alterações climáticas** e a **chuva ácida**;
- Problemas não relacionados com a energia, como a **degradação da camada de ozono** e a **produção de resíduos**;
- Destruição dos ecossistemas, incluindo a **desflorestação** e a **desertificação**.

Como recursos da construção destacam-se a energia, o consumo de matérias-primas sólidas orgânicas e inorgânicas, água e a utilização do solo. Como produtos salientam-se os resíduos sólidos, a emissão de gases poluentes, nomeadamente de GEE's (gases de efeito estufa), calor residual, pó, fumo e as águas residuais (fig. 3.2).

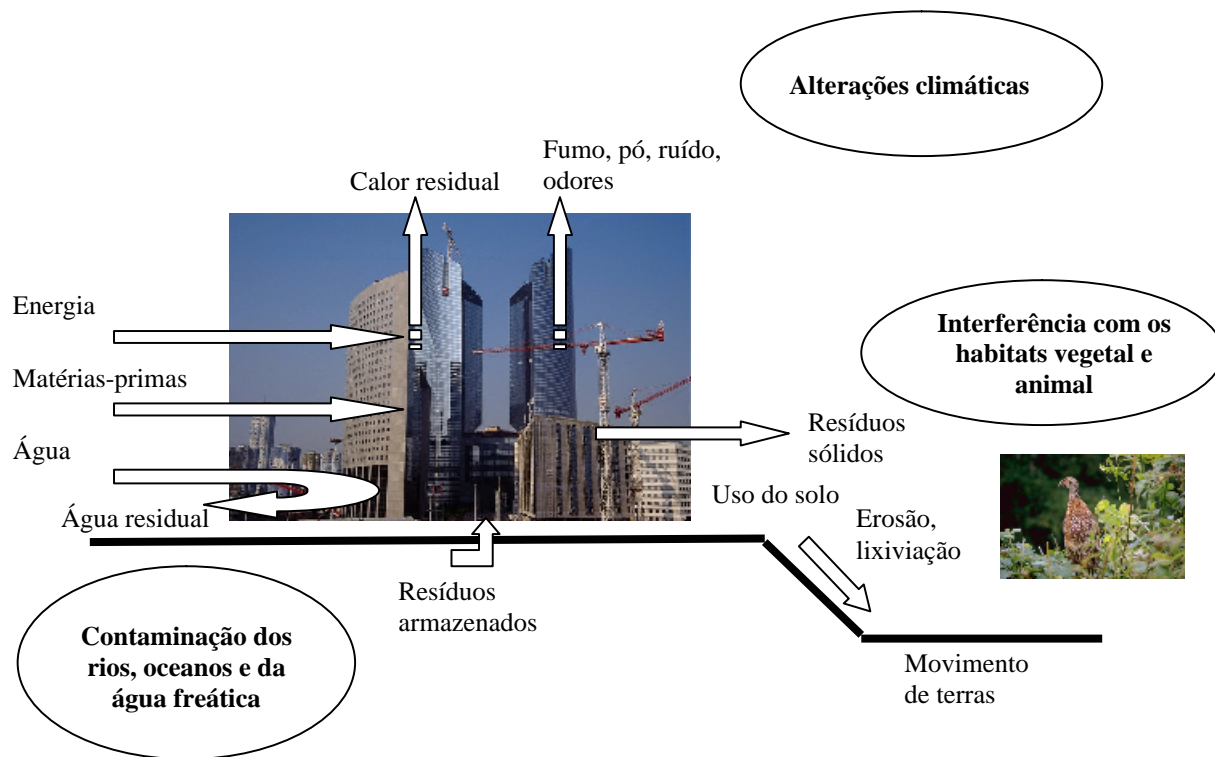



Figura 3.2 – Impacte do meio construído na sua envolvente

3.2. Recursos e produtos da construção

3.2.1. Energia

3.2.1.1. Enquadramento

Existem claramente duas épocas bem distintas e duas escalas temporais bem diferenciadas para o consumo de energia pelas sociedades humanas: antes da Revolução Industrial (há 200 anos) e desde a ocorrência desta até aos nossos dias e futuro próximo.

Antes da Revolução Industrial, as energias eram quase exclusivamente renováveis. A eólica servia para a navegação à vela, moagem de cereais, bombagem de água, entre outras, enquanto que a hídrica era usada sobretudo para a moagem de cereais. A biomassa (lenha) era utilizada para a confecção de alimentos e servia para aquecer os edifícios, tornando os Invernos mais aprazíveis.

A partir da Revolução Industrial começou-se utilizar-se o carvão mineral intensivamente. A partir do século XX, o carvão começou a ser substituído pelo petróleo e suas energias secundárias, sendo considerado a fonte de energia primária do século XX. Estes combustíveis (fosseis) foram sendo acumulados e formados na superfície da Terra ao longo de milhões e

milhões de anos, sendo agora transferidos para a atmosfera. Esta situação leva não só à sua exaustão, como a consequências ambientais em geral e climáticas em particular das quais já começamos a sentir os seus efeitos.

A maior parte da energia consumida nos edifícios em Portugal e no resto do mundo encontra-se sobre a forma de electricidade. A energia eléctrica é um tipo de energia secundária, obtida através do processamento de diferentes tipos de energias primárias renováveis e não renováveis.

Quadro 3.1 – Tipos de energia

Energia primária não renovável	Energia primária renovável	Energia secundária/final
Carvão mineral Petróleo Gás natural Urânio	Hídrica Lenha (Biomassa) Eólica Solar Geotérmica Energia das marés Álcool derivado da cana-de-açúcar	Electricidade Gasóleo Gasolina

A energia eléctrica produzida em Portugal é, na sua maior parte, proveniente de fontes de energia não renováveis, sendo produzida através da combustão de combustíveis fósseis (carvão mineral, gasóleo e gás natural). A combustão de combustíveis é responsável pela emissão de gases tóxicos como, por exemplo, compostos orgânicos voláteis: dióxido de carbono (CO_2) e monóxido de carbono (CO); compostos nitrogenados: óxido nítrico (NO) e o dióxido de azoto (NO_2), designados vulgarmente por NO_x e compostos sulfurados: óxidos de enxofre (SO_2, SO_3 e SO_4). Todos estes gases possuem efeitos extremamente perniciosos para o meio ambiente e para os ecossistemas: os óxidos de enxofre (H_2SO_4) juntamente com o NO_x (HNO_3) são responsáveis pela formação das chuvas ácidas, o CO_2 é um gás de efeito estufa (GEE) e a sua produção em excesso é responsável pelas alterações climáticas, o CO reduz a capacidade de captação de O_2 pelos seres vivos, o que origina hipóxia/anóxia, podendo originar problemas ao nível do sistema nervoso central ou mesmo a morte.

Sendo Portugal, um país dependente sob o ponto de vista energético, pois não se conhecem quaisquer reservas petrolíferas ou de gás natural, para além dos problemas ambientais resultantes da produção de energia através de combustíveis fosseis, existem também problemas económicos, resultantes da tendência natural de crescimento do preço do barril de petróleo, à medida que a sua quantidade vai diminuindo. Por outro lado, as fontes de combustíveis fosseis não são renováveis, estimando-se que tendo em conta os consumos anuais deste tipo de recursos e a sua evolução, as reservas disponíveis de gás natural e de petróleo só serão suficientes para mais cerca de 50 anos. Quanto às reservas de carvão, estima-se que estas serão suficientes para mais 1000 anos. Apesar das reservas de carvão existentes serem substancialmente superiores às reservas de outras energias primárias a sua utilização como energia alternativa traria efeitos devastadores sobre o meio ambiente (Berge, 2000).

O CO_2 emitido para a atmosfera é o maior responsável pela intensificação do efeito estufa. Este gás, está presente naturalmente na atmosfera, mas a combustão de carvão, petróleo e gás natural tem vindo a libertar o carbono armazenado nesses "combustíveis fósseis" em níveis sem precedentes. Da mesma forma, a desflorestação conduz à libertação do carbono armazenado em árvores. As emissões anuais subiram actualmente para mais de 23 biliões de toneladas de dióxido de carbono, o que é quase 1% da massa total do dióxido de carbono presente na atmosfera. Tal situação tem vindo a contribuir para as alterações climáticas.

O sector dos edifícios, pela sua expressão, é aquele que, dentro da indústria da construção, é responsável pela maior quota-parte nos consumos energéticos. Nos últimos anos, o aumento do nível de vida das famílias portuguesas, tem vindo a provocar o aumento das exigências de conforto, o que, conjuntamente com o elevado número de edifícios que foram surgindo nos últimos anos, onde só em 2001 e 2002 foram edificados cerca de 200 000 novos edifícios, perfazendo actualmente cerca de 3,3 milhões, tem levado ao crescimento exponencial dos consumos energéticos (Gonçalves *et al*, 2002).

São vários os consumos energéticos associados ao ciclo de vida dos edifícios e dos seus materiais e que decorrem desde as fases de produção dos materiais de construção e sua aplicação em obra, até à reabilitação/demolição dos materiais/elementos de construção, passando pelos consumos necessários à manutenção do conforto dos edifícios: iluminação artificial, condicionamento da temperatura e qualidade do ar interiores, aquecimento de água sanitária, equipamentos, cozinhas, etc.

3.2.1.2. Consumo energético nos edifícios

Como se pode verificar pela análise do gráfico da figura 3.3, o consumo de energia no sector dos edifícios representa cerca de 17,8% do consumo final total do país, sendo cerca de 9,1% associado ao uso residencial e 8,7% aos serviços, o que equivale no total ao consumo de 3,2 Mtep (milhões de toneladas de equivalente de petróleo).

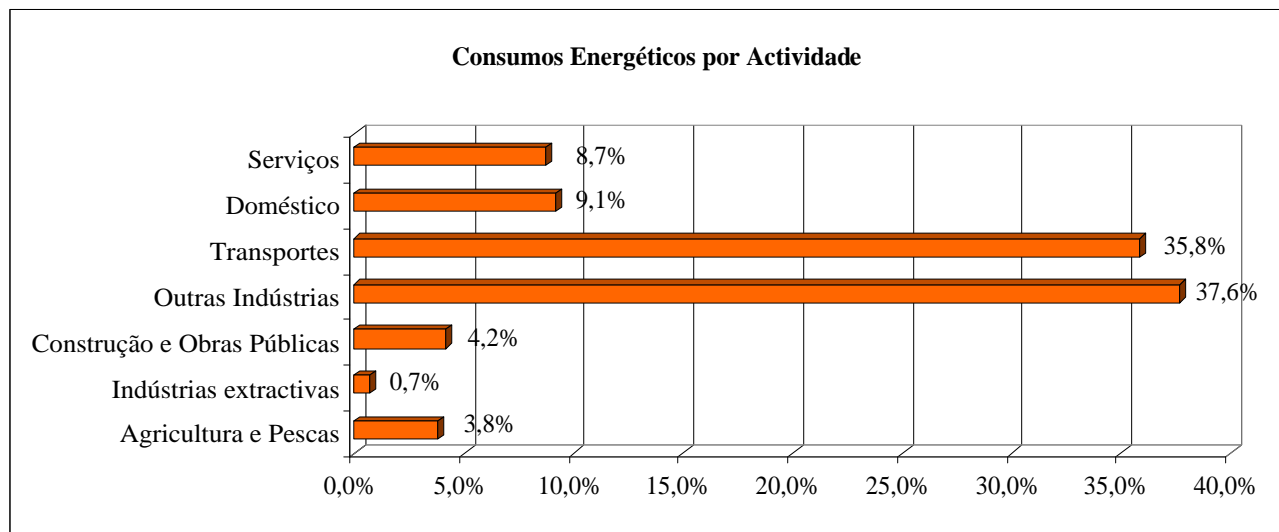



Figura 3.3 – Consumos energéticos for actividade (fonte: Balanço Energético Nacional – 2000)

O consumo de energia nos edifícios residenciais, distribui-se aproximadamente da seguinte forma: 50% para as cozinhas e produção de águas quentes sanitárias (AQS), 25% para o aquecimento e arrefecimento e os restantes 25% para a iluminação e equipamentos (electrodomésticos) (fig.3.4).

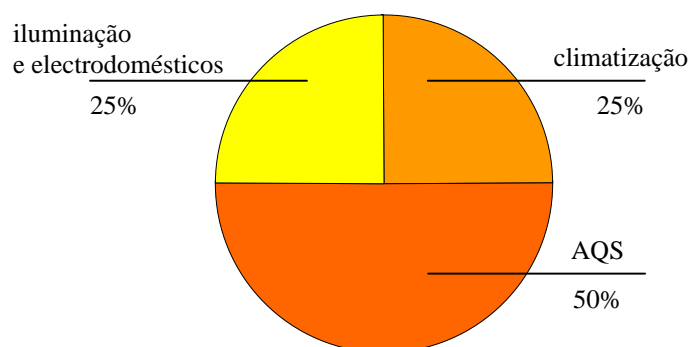



Figura 3.4 – Consumo de energia nos edifícios residenciais (Gonçalves *et al*, 2002)

São vários os factores que influenciam o consumo a este nível nos edifícios, sendo os mais importantes:

- O grau de conforto exigido pelos utilizadores e seu comportamento;
- O número de utilizadores;

- Condições climáticas do local, onde se encontra implantado o edifício (clima mais quente ou mais frio, com maior ou menor radiação solar);
- Condutibilidade térmica[1] (λ) dos elementos das envolventes do edifício (parte opaca e envidraçados);
- As perdas e ganhos de carga térmica associados à renovação do ar interior;
- Volume da construção (área útil e pé direito médio);
- Orientação da construção;
- Área de envidraçados e sua orientação;
- Condições económicas dos utilizadores;
- Eficiência energética dos equipamentos existentes.

O consumo energético nos edifícios têm vindo a aumentar exponencialmente devido ao crescimento do nível de vida dos portugueses e consequente aumento das exigências de conforto individual e das famílias. Nos últimos anos, têm ainda surgido novos equipamentos em resultado do forte desenvolvimento tecnológico verificado nas últimas décadas (televisores com comando à distância e modo "standby", computadores pessoais, micro-ondas, telemóveis, etc), o que conjuntamente com as maiores exigências ao nível do condicionamento térmico interior tem levado ao crescimento do consumo energético. Sendo a iluminação e os equipamentos (electrodomésticos) responsáveis por uma importante quota-parte do consumo energético, a redução do consumo a este nível poderá ser conseguida através da melhoria da eficiência energética dos mesmos. Se na concepção dos edifícios não forem considerados princípios, regras ou normas que promovam a utilização racional de energia, o crescimento na procura desses novos equipamentos e as maiores exigências ao nível de conforto térmico, que só poderão ser satisfeitas com maior recurso a equipamentos de climatização, terão como resultado o aumento dos consumos globais do sector e consequentemente do seu impacte ambiental.

Esta tendência de crescimento exponencial dos consumos energéticos no sector dos edifícios poderá comprometer o cumprimento das metas do Protocolo de Quioto, no qual Portugal foi signatário. A energia, no seu processo de conversão/utilização, contribui com cerca de 2/3 do total de emissões de GEE em Portugal, e para se cumprirem as metas deste Protocolo será necessário que os níveis de emissão no período de cumprimento (2008-2012) sejam os de 1990. No caso da EDP, um dos maiores representantes do sector dos electro-produtos em Portugal, as emissões de CO_2 ocorrem nas centrais térmicas, e em 2001 totalizaram cerca de 12 megatoneladas, sendo as mais poluentes, as centrais da Tapada do Outeiro (9089 gramas de dióxido de carbono por kilowatt produzido) e a de Sines (912 g/Kw). Actualmente, a produção de GEE já ultrapassa em 10,2% as metas definidas no Protocolo de Quioto. Assim, o país está em risco de ter de adquirir direitos de emissão na ordem dos 100 mil milhões de euros, valor

[1] Ver definição no glossário.

representativo do estrago potencial do CO_2, se não se alterarem as políticas actuais de desenvolvimento.

3.2.1.3. Práticas aconselhadas para a redução do consumo energético na manutenção do conforto térmico dos edifícios – EDIFÍCIOS SOLARES PASSIVOS

A envolvente ou "pele" de um edifício, reúne todos os elementos estruturais, materiais e restantes elementos que separam o ambiente interior do exterior, podendo incluir, portas, janelas, paredes, coberturas e pavimentos (fig. 3.5). Na concepção da envolvente, é necessário compatibilizar a necessária ventilação e iluminação natural com a protecção térmica e impermeabilização adequadas ao clima do local. A qualidade da envolvente é um dos factores que mais influencia a quantidade de energia que se vai consumir durante a fase de utilização de um edifício, nomeadamente nas operações relacionadas com a manutenção da temperatura de conforto interior e com a iluminação natural.

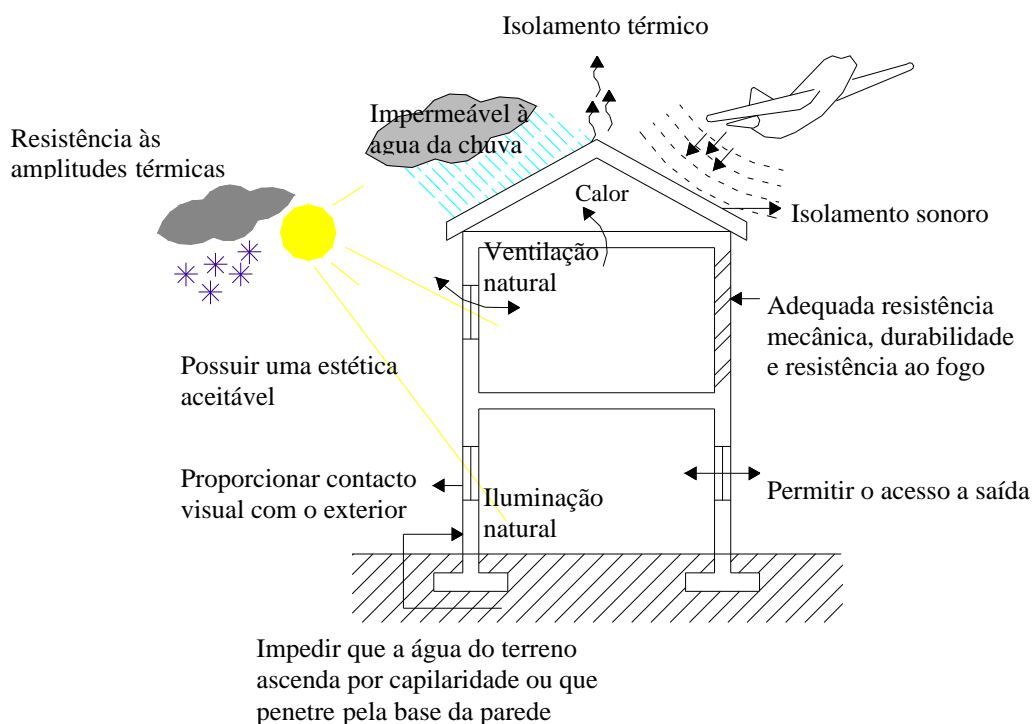



Figura 3.5 – Exigências funcionais da envolvente dos edifícios

Os edifícios que são concebidos de modo a utilizarem os recursos naturais (sol, água e vento) como elementos fundamentais tendo em vista o conforto térmico, denominam-se por **Edifícios Solares Passivos (ESP)** ou "**bioclimáticos**". Nestes edifícios, tenta-se evitar ao máximo a introdução de equipamentos de aquecimento e arrefecimento.

Através da integração dos princípios do comportamento solar passivo na concepção de um edifício, a equipa de projecto pretende tirar partido do clima do local de modo a:

- Melhorar o conforto dos edifícios;
- Reduzir ou eliminar custos energéticos nas operações de aquecimento e arrefecimento;
- Reduzir a produção de gases de efeito estufa através da diminuição do consumo de electricidade nos edifícios.

Durante a fase de concepção, a equipa de projecto, de modo a optimizar o comportamento solar passivo da envolvente dos edifícios, deverá realizar uma escolha criteriosa dos materiais a utilizar, e integrar o estudo da envolvente com os restantes projectos: iluminação natural e outras estratégias de comportamento solar passivo; aquecimento, ventilação, ar-condicionado (AVAC). O aspecto que mais influencia a concepção da envolvente é o clima. Assim, para cada tipo de clima (quente/seco, quente/húmido, temperado, ou frio), deverão ser consideradas diferentes estratégias no desenho e escolha dos materiais da envolvente.

Para além do clima, a definição da envolvente depende também da quantidade de calor produzida nos espaços interiores pelos seus utilizadores e equipamentos. Se a quantidade de calor produzida no interior for muito grande, serão as cargas térmicas produzidas no interior, e não as exteriores (solares), as que mais influenciarão os níveis de temperatura interior. O volume do edifício, bem como a sua orientação, são outros factores que influenciam significativamente o comportamento e os requisitos da envolvente. A envolvente deve ser cuidadosamente estudada de modo a ser compatível com o local de implantação e com a orientação do edifício.

Os vãos (aberturas) existentes na envolvente, também merecem um estudo aprofundado, pois a sua distribuição, proporção relativamente à parte opaca e a sua concepção, influenciam o comportamento da envolvente. Os vãos existentes na envolvente reúnem uma série de funcionalidades: permitem o acesso físico ao interior do edifício, as vistas para o exterior, a entrada de luz natural e/ou energia solar para o aquecimento do espaço interior e parte ou a totalidade de ventilação natural. As janelas têm grande influência na utilização dos espaços interiores, e na produtividade e conforto dos ocupantes. É através de janelas pouco eficientes que se perde uma parte considerável da energia necessária para o aquecimento e arrefecimento dos edifícios. Actuando nos tipos de caixilharia e envidraçado dos vãos é possível alterar significativamente o comportamento térmico da envolvente.

As preocupações não devem incidir unicamente ao nível da zona corrente da envolvente, sendo também conveniente o estudo detalhado dos diversos pormenores de construção. Cada material de construção transporta o calor de diferente modo. Nas zonas das fundações, consolas de varandas, topo de vigas, pilares, juntas de dilatação, juntas de montagem, conectores, entre outros, é possível formarem-se “caminhos” preferenciais para a transferência de calor. Estas zonas, conhecidas por **pontes térmicas**, são áreas onde o isolamento térmico é inferior ao isolamento da zona corrente da envolvente. A eficiência térmica da envolvente só será assegurada se não se esquecerem estes pormenores e se se realizar uma escolha criteriosa dos materiais de isolamento a aplicar e da sua localização.

Ao nível da envolvente pode-se actuar atendendo na fase de concepção a aspectos relacionados com o clima do local e com a eficiência térmica (AGO, 2003):

1) Considerações Climáticas

(i) **Estudar o clima do local**, usando os dados climáticos médios anuais (precipitação, temperatura e regime de ventos) de modo a determinar os materiais e o tipo de envolvente adequados ao edifício. As seguintes considerações devem ser tomadas, conforme o tipo de clima do local:

- Em **clima temperado**, devem-se escolher os materiais atendendo ao local e ao tipo de estratégias de aquecimento/arrefecimento a utilizar. Em geral, os edifícios nestas zonas devem ser bem isolados. As considerações arquitectónicas referidas neste ponto são aquelas que mais se adequam à realidade climática de Portugal, havendo apenas necessidade de distinguir o clima existente na faixa litoral (**temperado-ameno**), caracterizado por temperaturas amenas durante todo o ano, e o clima existente no interior (**temperado-frio**), caracterizado por uma baixa humidade relativa e, consequentemente, com elevadas amplitudes térmicas diurnas, e Invernos mais frios. Em clima **temperado-ameno,** um estudo cuidado do projecto pode evitar a utilização de sistemas de arrefecimento/aquecimento auxiliares. Assim, devem-se utilizar soluções construtivas de elevada inércia térmica, estudar as envolventes de modo a permitir a captação da radiação solar durante a estação de aquecimento, e a protecção dos envidraçados durante a estação de arrefecimento (através da criação de alpendres, implantação de sombreadores ou colocação de toldos), sendo preferível a criação de envidraçados nas fachadas orientadas a Sul e a minimização dos envidraçados com outras orientações. Deve-se utilizar nos vãos vidro duplo e caixilharias de corte térmico e os espaços interiores mais utilizados (sala de estar, escritório, sala de jantar), devem estar situados na fachada Sul. Em clima **temperado-frio**, como as amplitudes térmicas diurnas são mais elevadas, a utilização de soluções com elevada inércia térmica é mais importante do que nas zonas de clima temperado-ameno. As soluções de isolamento térmico devem ser estudadas ao pormenor, devendo-se reforçar o isolamento em zonas de potenciais pontes térmicas. Nestas zonas climáticas, pode ser necessário utilizar sistemas de aquecimento auxiliar, devendo-se prever sistemas que utilizam energias renováveis (fig. 3.6).

Figura 3.6 – Exemplo de um edifício adequado ao clima temperado (Yarra JCT – Austrália)

- Em clima **quente e seco** é aconselhável a utilização de soluções de elevada inércia térmica. A inércia térmica de um edifício é caracterizada pela capacidade de armazenamento de calor que o edifício apresenta e depende da massa superficial útil de cada um dos elementos e materiais de construção. Nas zonas de clima quente e seco, os edifícios estão sujeitos a grandes amplitudes térmicas diurnas pelo que uma elevada inércia térmica ajuda a atenuar e a atrasar as variações de temperatura nos espaços interiores. A elevada capacidade de armazenamento de calor dos materiais permite que o calor penetre devagar através das paredes e da cobertura. Após o pôr-do-sol a temperatura exterior nestes locais tende a baixar acentuadamente e a elevada massa térmica dos edifícios actua como volante de inércia – de dia os espaços interiores estão mais frescos que o ambiente interior e à noite verifica-se o inverso. As aberturas na envolvente devem ser estudadas de modo a permitirem o controlo de entrada directa da radiação solar. Assim são de evitar as aberturas orientadas a Este e a Oeste, devendo-se optar pela criação de aberturas orientadas a Sul (orientadas a Norte se o local fica situado no hemisfério Sul), devidamente sombreadas, de modo a não permitirem a radiação solar directa no Verão, mas de modo a admiti-la no Inverno. Nos edifícios tradicionais destas zonas climáticas é possível observar certas solução arquitectónicas que revelam que os seus projectistas tiveram em conta os aspectos mencionados: as soluções arquitectónicas existentes são caracterizadas por paredes exteriores de elevada espessura, construídas com materiais de elevada massa, como a alvenaria de pedra e o adobe (fig. 3.7).

Figura 3.7 – Casas tradicionais de elevada inércia térmica, construídas em Adode (Pueblo Revival Houses – Sudoeste dos Estados Unidos)

- Em clima **quente e húmido (tropical)** a elevada humidade relativa existente na atmosfera actua como volante de inércia nas flutuações de temperatura, não havendo grandes diferenças entre os picos de temperatura diurna e a temperatura mínima verificada após o pôr-do-sol. Assim, é aconselhável a utilização de materiais com baixa massa térmica, devendo-se optar sistemas construtivos de baixa massa. Nas construções tradicionais destas zonas climáticas, por vezes, utilizam-se materiais higroscópios, que absorvem parte das elevadas concentrações de humidade existente nos espaços interiores, devolvendo-a ao ambiente quando o teor de humidade baixa. Nestas zonas, de modo a maximizar as perdas de calor por convecção deve-se: maximizar a área da envolvente, preferindo a criação de plantas onde os edifícios possuem a mesma largura dos compartimentos interiores; favorecer a circulação interior de ar (ventilação cruzada) através da criação de aberturas nas fachadas orientadas a Norte e a Sul, devidamente protegidas contra a radiação solar directa e localizar os edifícios em zonas sujeitas a brisas. De modo a se minimizarem os ganhos de calor deve-se: localizar os edifícios em locais com baixa exposição solar (por exemplo rodeados de vegetação); utilizar materiais claros no acabamento dos paramentos exteriores e no revestimento das coberturas; criar alpendres na periferia do edifício, impedido os ganhos directos através dos vãos; utilizar sistemas de isolamento térmico reflectivo e barreiras pára-vapor (fig. 3.8 e 3.9).

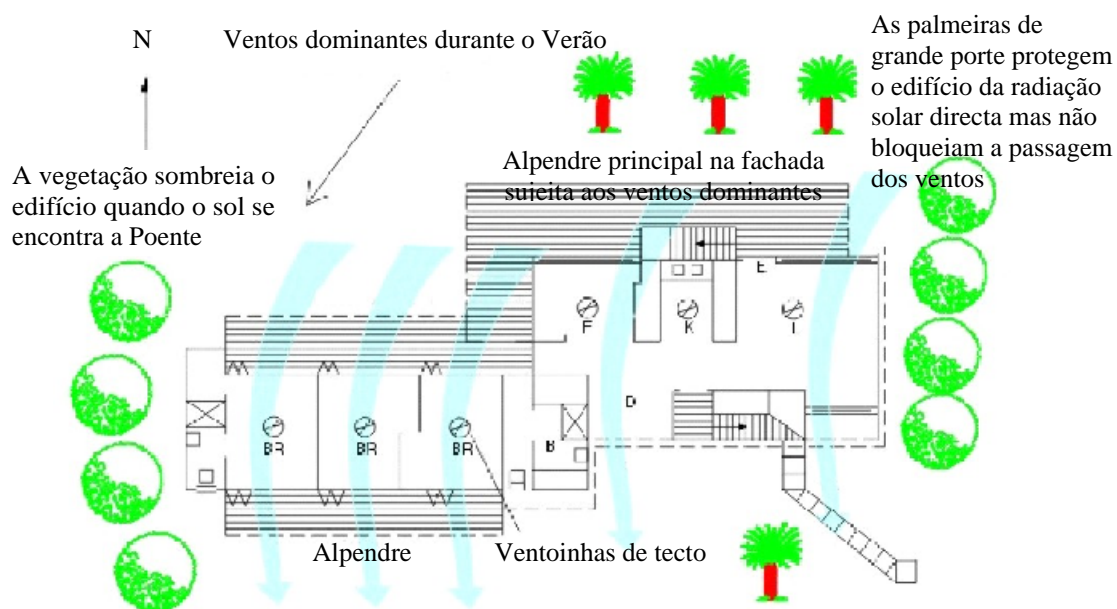



Figura 3.8 – Princípios a considerar na concepção de edifícios a construir em clima quente e húmido (tropical) – exemplo para o hemisfério Sul

Figura 3.9 – Exemplo de um edifício adequado ao clima quente e húmido (Brisbane – Austrália)

- Em **clima frio** deve-se proteger a envolvente da acção dos ventos e utilizar grandes espessuras de isolamento térmico. A inércia térmica dos materiais a utilizar neste clima vai depender da estratégia escolhida para o aquecimento dos edifícios. Em edifícios onde seja de prever a ocupação intermitente não é aconselhável a escolha de materiais com elevada massa térmica, pois a massa térmica atrasa o aquecimento dos espaços interiores até se atingir a adequada temperatura de conforto, aumentando consequentemente os gastos energéticos. Em edifícios ocupados continuamente, os materiais de elevada massa térmica atrasam o arrefecimento dos espaços interiores, o que favorece a redução dos consumos energéticos. Os edifícios nestas zonas climáticas devem ser concebidos de modo a possuírem envolventes com a menor área possível, pois quanto maior for a área da envolvente maiores serão as perdas energéticas (fig. 3.10).

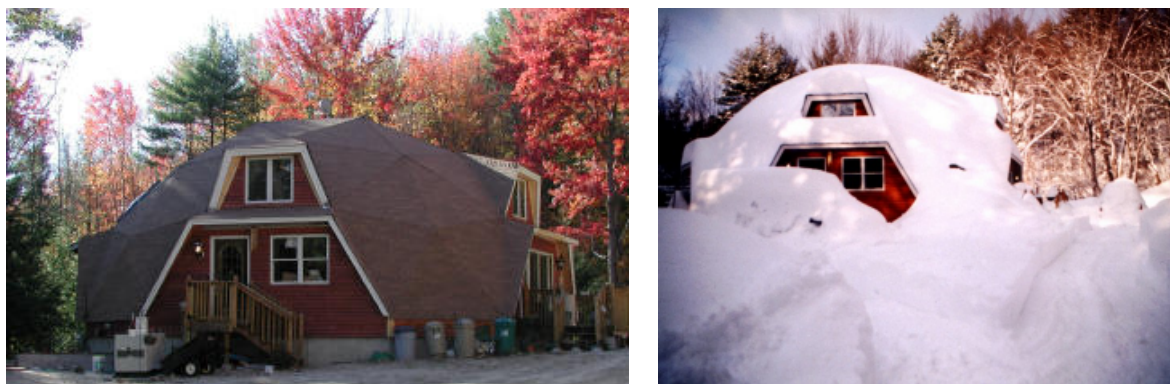



Figura 3.10 – Exemplo de uma construção adequada ao clima frio (Warner house, New Hampshire, E.U.A)

(ii) **Estudar a geometria solar do local.** Os ganhos solares na cobertura, paredes e envidraçados, podem contribuir tão positiva como negativamente para as necessidades de aquecimento, arrefecimento e conforto dos ocupantes. Só o amplo conhecimento da geometria solar do local de implantação do edifício permite a concepção adequada da envolvente.

(iii) **Estudar o tipo de envidraçado a aplicar nos vãos**. Actualmente, são fabricados vários tipos de envidraçado com características solares distintas, que importa conhecer de modo a optimizar o comportamento dos envidraçados. Os envidraçados podem apresentar camadas metálicas ou pigmentos superficiais de modo a absorverem ou reflectirem determinados comprimentos de onda do espectro solar, sendo caracterizados em função das suas características espectofotométricas: factores de transmissão[1], de reflexão[1] e absorção energéticos[1]; factores de transmissão[1] e de reflexão luminosos[1] e factor solar. Os envidraçados devem permitir a passagem dos comprimentos de onda do espectro visível, enquanto reflectem outros comprimentos de onda, como os de infra-vermelhos (responsáveis pelo aquecimento) e os ultra-

[1] Ver definição no glossário.

violeta (nocivos ao Homem e a certos materiais de construção) (fig. 3.11). É possível controlar o excesso de calor e a entrada dos nocivos raios ultra-violeta sem afectar a iluminação. Em suma, no que respeita à protecção solar dos envidraçados devem ser considerados três objectivos:

- Diminuição dos ganhos solares na estação de arrefecimento **(factor solar mínimo**);
- Diminuição das transferências de calor entre o exterior e o interior (**coeficiente de transmissão térmica mínimo**);
- Maximização da transmissão luminosa (**factor de transmissão luminosa elevado**).

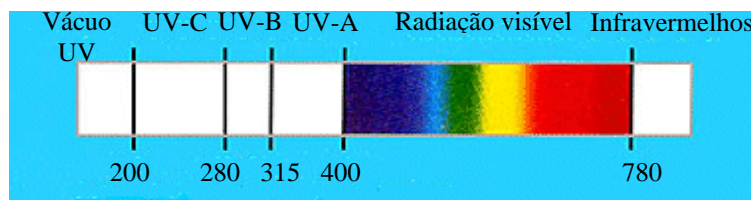



Figura 3.11 – Espectro da radiação solar (comprimento de onda em manómetros - nm)

2) Eficiência Térmica

(i) **Estudar a função do edifício, a quantidade e tipo de equipamento que será utilizado**. A temperatura interior de um edifício não depende apenas da transmissão térmica verificada ao nível da envolvente mas também da quantidade de calor que é produzida pelos ocupantes e equipamentos. É importante conhecer este factor pois, para além de condicionar a temperatura interior e com isso influenciar o conforto dos ocupantes, influencia também a taxa a que se verificam as trocas de calor entre o espaço interior e o exterior pois, as perdas de temperatura através da "pele" do edifício são proporcionais às diferenças de temperatura entre os dois espaços. Em certos edifícios, como por exemplo, nos grandes centros comerciais, onde se produz grande quantidade de calor, a temperatura do espaço interior será menos influenciada pelas flutuações de temperatura exterior do que, por exemplo, num edifício de habitação onde existem menores fontes internas de calor.

(ii) **Assegurar que os elementos da envolvente – fachadas, empenas, coberturas e pavimentos – apresentam adequada resistência térmica.** A cobertura é o elemento de construção mais vulnerável às perdas de calor durante a estação de aquecimento (Inverno) e aos ganhos de calor durante a estação de arrefecimento (Verão). O estudo incorrecto da solução de isolamento térmico da cobertura e dos restantes elementos da envolvente compromete o conforto interior influenciando a quantidade de energia consumida nas acções de controlo da temperatura interior. Em Portugal, existe desde o início da década de 90 um documento normativo, o "Regulamento das

Características de Comportamento Térmico dos Edifícios" (RCCTE), Decreto-Lei 40/90 de 6 de Fevereiro; que obriga os projectistas a estudar minimamente o comportamento térmico da envolvente para que os consumos de energia eléctrica (auxiliar) durante o Verão e Inverno não ultrapassem os valores etiqueta ou índices de consumo de energia em condições nominais convencionais, previstos para cada uma dessas estações. Será actualmente impossível a conformidade regulamentar das características de comportamento térmico dos edifícios se não for acautelada alguma solução de isolamento térmico em todos os elementos da envolvente. Na escolha dos materiais de isolamento térmico, para além das condicionantes regulamentares deve-se ainda ter em conta outros factores relacionados com o impacte ambiental. Assim, deverão ser evitados materiais de isolamento fabricados à base de clorofluorcarbonetos (CFC's) ou hidroclorofluorcarbonetos (HCFC's), pois a estes compostos são atribuídas responsabilidades na degradação da camada de ozono. Será assim aconselhável a utilização de materiais de isolamento fabricados a partir de materiais reciclados ou naturais como, por exemplo, a cortiça e a lã mineral, desde que sejam compatíveis com as exigências e os objectivos económicos do projecto. A existência de pontes térmicas, muito comum nos sistemas porticados (vigas e pilares de betão), derivada da elevada condutibilidade térmica do betão e obriga à sua correcção através da aplicação de uma camada de isolante térmico, devidamente dimensionada, de forma a limitar as pontes térmicas.

(iii) **Considerar a reflectância[1] do acabamento exterior da envolvente.** Em regiões climáticas onde se prevejam elevados ganhos de temperatura através da envolvente é de todo conveniente escolher materiais de acabamento exterior de cor clara e elevada reflectância. Não se deve no entanto esquecer, o impacte destas soluções nos edifícios vizinhos pois, se por um lado, uma superfície exterior fortemente reflectante resulta numa menor necessidade de energia auxiliar de arrefecimento, por outro, esta poderá aumentar as cargas térmicas e a diminuição do conforto dos edifícios vizinhos.

(iv) **Prevenir condensações no interior da envolvente**. Todos os materiais de construção apresentam uma certa permeabilidade à passagem do vapor de água. Em certas condições, o vapor de água que atravessa a envolvente do edifício, geralmente do interior para o exterior, tende a condensar. Quando esta situação ocorre, os materiais ficam húmidos, conduzindo à perda de parte da sua performance térmica, o que também contribui para a sua degradação precoce. Este fenómeno pode ser resolvido através da introdução de barreiras pára-vapor, de folha metálica ou plástica, nos elementos da envolvente, o mais próximo possível do paramento mais quente. No caso das paredes duplas a adequada ventilação e drenagem das caixas-de-ar evita estes inconvenientes. A concepção de sistemas de ventilação, preferencialmente de ventilação natural, de modo a evacuar o excesso de teor de humidade dos espaços interiores, contribui para a diminuição destes fenómenos.

(v) **Vedar convenientemente as portas e janelas**. É de todo conveniente controlar as perdas de calor que se verificam através da circulação não controlada de ar nas frestas

---

[1] Ver definição no glossário

existentes entre os caixilhos e batentes das portas e janelas exteriores, assim como, nas frestas existentes entre a base das portas e a superfície do pavimento. Esta operação designa-se por calafetagem. A calafetagem das portas e janelas, apesar de conveniente, só deverá ser levada a cabo se existirem outros modos de ventilação que assegurem a renovação do ar interior e que, por conseguinte, assegurem a sua qualidade pois, não são raros os casos, em que a correcção destas circulações de ar não controladas esteve na origem do aparecimento de condensações interiores que, até então, não se manifestavam. Nos edifícios antigos, principalmente naqueles que utilizam caixilharias de madeira, as perdas de energia por este meio são bastante significativas, o que se traduz em custos económicos e ambientais elevados. Estas zonas devem ser inspeccionadas periodicamente de modo a assegurar a sua impermeabilidade ao ar. Existem várias soluções para a calafetagem dessas zonas, sendo algumas delas exemplificadas de seguida:

- A figura 3.12 apresenta três soluções possíveis para a **calafetagem da junta de entre o caixilho e o batente de portas e janelas** em caixilharias de madeira: i) Junta adesiva em espuma de polietileno ou noutra espuma microcelular. Colada na ranhura do batente forma um tampão entre este e o caixilho. Dos processos de calafetagem é o mais simples de aplicar. É também o menos robusto sendo, por isso, necessário proceder à sua substituição periódica. A fita esponjosa é vendida em rolos com diversos comprimentos e espessuras (fig. 3.12.a); ii) Junta flexível constituída por um perfil em neoprene ou PVC, de secção em V. Uma das abas fixa-se ao batente e a outra apoia-se contra o caixilho quando está fechado, Apesar de mais cara que a anterior esta junta é, no entanto, mais durável (fig. 3.12.b); iii) Junta metálica formada por duas lamelas muito finas articuladas entre si. Pode ser em aço ou em bronze fosforoso. É uma junta muito robusta e durável e é vendida a preços comparáveis aos da junta flexível (fig. 3.12.c).

- A figura 3.13 apresenta três soluções possíveis para a **calafetagem da junta inferior das portas**: i) Utilização de uma junta de borracha fixa na porta e que arrasta pelo chão – junta de calafetagem. Esta solução apesar de ser económica é pouco robusta sendo, por isso, necessária a sua substituição periódica (fig. 3.13 b); ii) Utilização de uma articulação automática interior – barras pé de porta giratórias. Estas articulações são formadas por: um suporte metálico fixado no interior da porta junto à sua base; uma aba rotativa com uma junta flexível em neoprene; esta aba está ligada a uma pequena haste com um rolete. Quando a porta se fecha, o rolete apoia-se no batente e roda para a posição vertical, empurrando a junta flexível que vai fechar a fresta, apoiando-se no solo. Este sistema é eficaz e de instalação simples. A junta não se arrasta pelo pavimento, obtendo-se portanto uma grande duração (fig. 3.13 b). iii) Utilização de barras pé de porta retrateis. Assim como as anteriores, as retrateis são dotadas de um mecanismo que as faz levantar quando a porta se abre, e baixar quando esta se fecha (fig. 3.13 c).

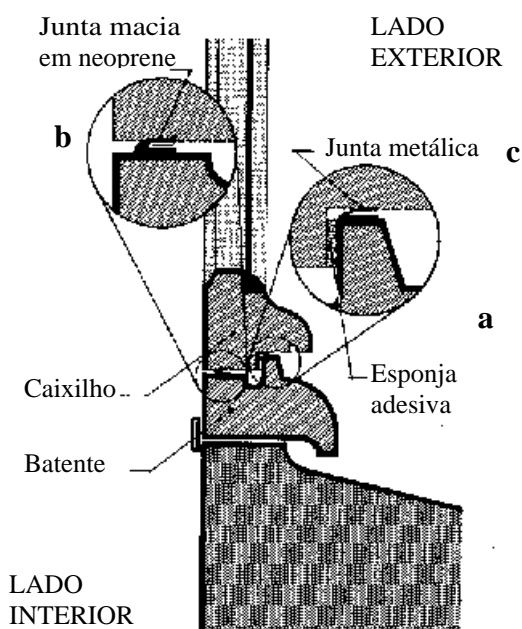



Figura 3.12 – Soluções para a calafetagem da junta entre o caixilho de portas e janelas e o batente em caixilharias de madeira (Frénot *et al*, 1979)

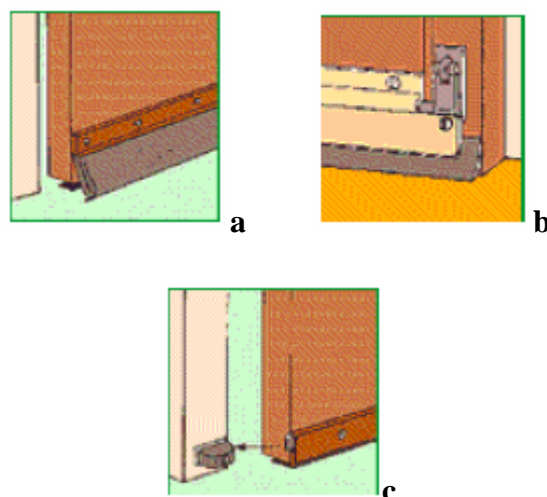



Figura 3.13 – Soluções para a calafetagem da junta entre a base da porta e o pavimento

(vi) **Escolher materiais de construção e detalhes construtivos que reduzam a transferência de calor**. As trocas de energia térmica pela envolvente ocorrem através de três modos de propagação distintos: **condução**[1], **radiação**[1] e **convecção**[1]. O calor total transferido pelos mecanismos combinados de condução e convecção é frequentemente expresso em termos de um **Coeficiente de Transmissão Térmica –** U (antigo coeficiente K). Este coeficiente representa o fluxo de calor que atravessa 1m^2 de parede para a diferença de temperatura de um grau entre o interior e o exterior de um local e exprime-se em W/m^2 ºC. Os materiais de construção conduzem o calor a diferentes taxas. Os metais possuem elevada condutibilidade térmica (52 = λ (W/m.ºC) = 415), enquanto que, por exemplo a madeira possui condutibilidade térmica muito menor (λ ≈ 0,20 W/m.ºC). São considerados materiais isolantes os materiais com condutibilidade térmica menor a 0,17 W/m.ºC. A título de exemplo, no quadro 3.2 encontra-se representada a condutibilidade térmica de alguns materiais. O conhecimento da condutibilidade térmica dos diversos materiais de construção, é de vital importância para a selecção dos materiais e soluções construtivas a utilizar. A título de exemplo, analisando o quadro 3.2, podemos concluir que as paredes da envolvente que incluam sistemas de suporte (pilares e vigas) metálicos possuirão pior comportamento térmico que paredes que incluam sistemas de suporte em madeira. Ao nível dos detalhes construtivos devem-se ter em conta os seguintes princípios:

[1] Ver definição no glossário.

- De modo a reduzir as perdas de calor por condução através das pontes térmicas é de todo necessário a execução de pormenores (detalhes) destes locais;

- Para se reduzir as perdas de temperatura por convecção, devem-se desenvolver pormenores que evitem as trocas de calor através de entradas e saídas de ar não controladas. As infiltrações e saídas de ar não controladas têm lugar principalmente nas juntas existentes entre os elementos construtivos, sendo bons exemplos, as zonas de batente das portas e janelas. Para essas zonas, devem ser estudadas soluções de calafetagem que utilizem materiais com baixo impacte ambiental e que não comprometam a qualidade de ar interior.

Quadro 3.2 – Condutibilidade térmica de alguns materiais

Material	λ (W/m.ºC)	Material	λ (W/m.ºC)
Aço carbono	60	Ferro puro	80
Alumínio fundido	170	Gesso	0,35 – 0,50
Ar	0,0263	Lã de rocha	0,040 – 0,045
Barro	1,3	Lã de vidro	0,40-0,45
Basalto	1,6	Latão	110
Betão	1,2-1,4	Madeira	0,12-0,23
Chumbo	35	Madeira, aglomerado	0,058-0,20
Cimento	1,4	Mármore	2,80
Cobre	400	Poliestireno expandido	0,04
Cortiça, aglomerado	0,08	Poliuretano expandido	0,03
Cortiça, aglomerado negro	0,045	Vidro	1,4
Cortiça comprimida	0,1	Zinco	116

3.2.1.4. Regulamentos energéticos em Portugal

Em 1990 surgiu o primeiro documento normativo nacional no âmbito da térmica de edifícios, o **RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios**), Decreto-Lei 40/90 de 6 de Fevereiro, em resposta à necessidade de existir um instrumento legal que regulamentasse as condições térmicas do parque construído, de forma a satisfazer as aspirações da população "a melhores condições de salubridade, de higiene e de conforto nos edifícios em geral e na habitação, em particular, e que tem a ver, também, com o consumo actual e potencial da energia para o conforto térmico (aquecimento e arrefecimento) e para conforto visual (iluminação), bem assim como a qualidade de construção em geral". Este documento visava fundamentalmente impor uma melhoria na qualidade térmica da envolvente dos edifícios, no sentido da "melhoria das condições de conforto sem acréscimo dos consumos de energia".

Este regulamento, incentiva os promotores, engenheiros, arquitectos e utilizadores finais a aplicar o conceito de Edifícios Solares Passivos (ESP). Com o conceito ESP, tenta-se melhorar o comportamento térmico dos edifícios durante a estação de aquecimento (Inverno) e de arrefecimento (Verão), através da introdução de uma série de condicionantes nas envolventes dos

edifícios, e com isto melhorar o conforto térmico com necessidades energéticas ainda menores. Assim, para que os edifícios tivessem melhor comportamento durante o Inverno promoveu-se a utilização de envolventes opacas (paredes e coberturas) e translúcidas (envidraçados) com melhor isolamento térmico, através da introdução de isolantes nas paredes exteriores e de vidros duplos nos vãos. Promoveu-se também, para além da melhoria ao nível do isolamento térmico, uma maior eficácia na captação da energia solar disponível, através de envidraçados bem orientados (Sul) e protegidos durante a noite por estores ou dispositivos equivalentes que diminuíssem as perdas através destes, durante o período nocturno. Durante o Verão, as preocupações ao nível da captação da energia solar são exactamente opostas, pretendendo-se evitar ao máximo o aquecimento dos espaços interiores devido à entrada de energia solar pela envolvente opaca e translúcida, sendo este objectivo conseguido pela utilização de elementos sombreadores nos envidraçados, principalmente nos orientados a Sul, e pelo recurso à ventilação natural como forma de remover a carga térmica interior, sempre que conveniente.

O outro regulamento nacional existente neste contexto é o **RSECE** (**Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização nos Edifícios**), Decreto-Lei 118/98 de 7 de Maio. Este regulamento destina-se aos edifícios onde há consumos significativos de energia para climatização (aquecimento e/ou arrefecimento). Como grande parte da energia consumida por esta via se verifica principalmente nos edifícios de serviços, este regulamento destina-se sobretudo a este tipo de edifícios. No entanto, aplica-se também a todos os edifícios residenciais que possuam sistemas de condicionamento da temperatura interior com potência instalada superior a 25 kW. Este regulamento tem como objectivo disciplinar a dimensão (potência) dos sistemas de climatização instalados, para evitar os sobredimensionamentos exagerados e com isto diminuir os consumos energéticos correspondentes. Este regulamento impõem também, na mesma linha de orientação, um conjunto de medidas de racionalização dos consumos, como por exemplo, a recuperação de calor, o arrefecimento gratuito, os sistemas de gestão de energia, os fraccionamentos de potência nos equipamentos produtores de frio e de calor e respectivas eficiências mínimas, as práticas de boa manutenção e a responsabilização dos projectistas e dos instaladores, entre outras.

Estes regulamentos apesar de estabelecerem requisitos mínimos de qualidade, exigindo o cumprimento das necessidades nominais de energia para a climatização no caso do RCCTE ou da potência máxima a instalar no caso do RSESE, deixam grande liberdade aos projectistas para utilizarem as soluções técnicas que pretenderem, pois não são de carácter prescritivo ao nível das soluções técnicas, dando liberdade à criatividade dos intervenientes neste sector, favorecendo, por conseguinte, a inovação, como é desejável.

Estes regulamentos, apesar de serem considerados pela maioria dos intervenientes da construção bastante moderados, em termos exigênciais, o que é natural por terem sido as primeiras intervenções a este nível no sector, foram assimilados e tiveram um impacto significativo na forma de construir em Portugal, tendo-se assistido, na última década, a um salto qualitativo positivo nos edifícios. Hoje, contrariando a realidade existente antes da criação do RCCTE, a maioria dos edifícios possuem isolamento térmico e o vidro duplo é agora norma nas construções de boa qualidade. Com o RSECE conseguiu-se limitar os galopantes consumos ao nível da climatização, principalmente nos edifícios de serviços. O comportamento térmico dos edifícios passou a ser um aspecto diferenciador de qualidade que, indo ao encontro dos desígnios dos seus

utilizadores, acabou por potenciar a procura de edifícios e apartamentos, que integram preocupações a este nível.

Estando a maioria dos intervenientes no processo construtivo bem familiarizados com estes regulamentos e sensibilizados para a necessidade da sua efectiva aplicação, é agora necessário proceder à sua revisão de modo a aumentar o seu grau de exigência e melhorar o desempenho energético de referência para os edifícios novos (a construir), bem como para os edifícios a renovar.

Em 2001, o governo português optou formalmente pelo Programa E4 (**E**ficiência **E**nergética e **E**nergias **E**ndógenas), que tem com objectivo de "…***pela promoção da eficiência e da valorização das energias endógenas, contribuir para a melhoria da competitividade da economia portuguesa e para a modernização da nossa sociedade, salvaguardando simultaneamente a qualidade de vida das gerações pela redução de emissões, em particular de*** CO_2***, responsável pelas alterações climáticas"*** (DGE, 2003). Para que estes objectivos sejam atingidos o Programa E4, compreende a revisão dos regulamentos existentes em Portugal sobre esta matéria, nomeadamente o RCCTE e o RSECE, de modo a torná-los mais exigentes.

Como o **novo RCCTE**, pretende-se manter a mesma estrutura do regulamento existente, havendo apenas alterações ao nível das exigências, de modo a promover a maior eficiência energética e utilização dos recursos endógenos e consequentemente os edifícios solares passivos, através da (DGE, 2003):

(i) **Actualização das características térmicas de referência para a envolvente dos edifícios**, com base nos critérios de viabilidade económica indicados na Directiva Europeia para a Eficiência Energética dos Edifícios, que apontam para a adopção de todas as medidas de conservação de energia com período de recuperação do investimento de oito anos ou inferior;

(ii) **Duplicação**, na generalidade, das **espessuras de isolamento** nos elementos da envolvente exterior (paredes, coberturas e pavimentos exteriores), o que se traduz na melhoria em 40% dos coeficientes de transmissão térmica, relativamente aos exigidos actualmente;

(iii) **Adopção de vidros duplos**, pelo menos nos climas mais frios e nas orientações sem ganhos solares significativos.

(iv) **Consideração da forma dos edifícios** no cálculo das necessidades de energia para a climatização. Através da introdução de um factor relacionado com a forma dos edifícios, pretende-se que nos edifícios com envolventes demasiado recortadas a equipa de projecto seja forçada a adoptar um maior grau de isolamento, para não se exceder o nível regulamentar das necessidades nominais de energia para climatização.

(v) **Contabilização da contribuição de sistemas solares passivos** (para além das janelas), **de sistemas de aquecimento de água sanitária** (em favorecimento da água quente produzida por sistemas de colectores solares) e de **equipamentos e iluminação mais eficiente** (fomentado o recurso a equipamentos e iluminação

pertencentes às categorias mais eficientes, segundo os respectivos certificados energéticos).

Estas alterações permitirão uma redução significativa dos consumos energéticos no sector residencial e dos pequenos edifícios de serviços a licenciar, sejam estes edifícios novos, isto é a construir, como também edifícios já existentes que sofram obras de reabilitação cujo custo seja superior ou igual a 25% do valor dos edifícios construído de novo, não contabilizando o custo do terreno.

Considerado o actual regulamento como cenário base, tendo em conta as medidas de alteração propostas para o RCCTE, verifica-se que em termos nacionais as necessidades médias de energia por unidade de área de habitação diminuirão em cerca de 40%. Será na zona centro do país onde as alterações terão mais impacto, prevendo-se uma redução de cerca de 43% (fig. 3.14).

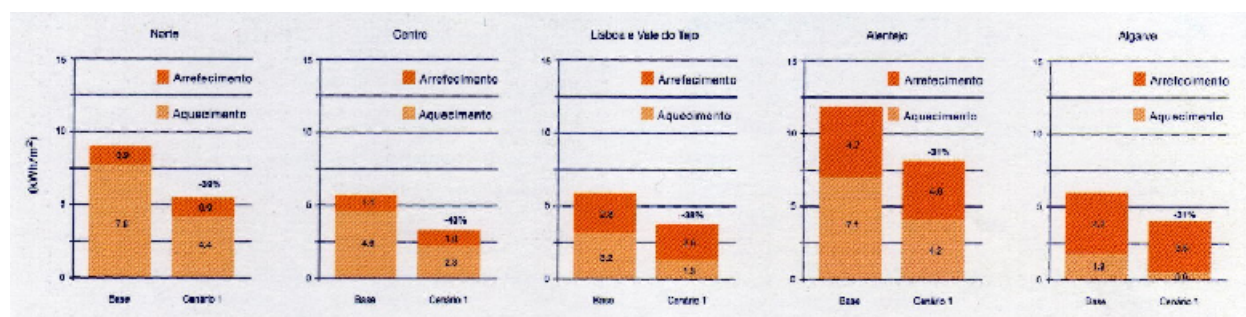



Figura 3.14 – Necessidades de energia por unidade de área de habitação e por região

Para que estes objectivos sejam realmente alcançados preconizam-se uma série de medidas, destacando-se a necessidade de **apresentação do Certificado Energético** no final da construção de edifícios novos ou reabilitações importantes.

A **certificação energética dos edifícios** é uma das obrigações que serão impostas a Portugal pela Directiva Comunitária sobre Eficiência Energética e apresenta os seguintes objectivos específicos (DGE, 2003):

(i) **Informar o utente**, potencial proprietário ou locatário de um edifício ou fracção independente, **sobre as características térmicas do produto/imóvel que lhe é oferecido**, as quais irão influenciar necessariamente os custos de funcionamento de sistemas para manutenção de um ambiente interior mais confortável;

(ii) **Permitir seleccionar** entre várias opções disponíveis **e decidir** na posse de todas as variáveis e informações relevantes;

(iii) **Informar o consumidor sobre potenciais medidas que melhorem o desempenho energético do edifício** e da respectiva viabilidade económica;

(iv) **Informar e sensibilizar os utentes dos edifícios públicos, de maior dimensão, sobre o desempenho energético do edifício**, com o objectivo de promover a sua reabilitação energética sempre que necessário;

(v) **Permitir aos diversos decisores nesta área, a recolha de informação objectiva actualizada sobre o desempenho do parque construído**, de modo a que sejam tomadas as medidas necessárias ao aumento da eficiência global do sector.

Os **Certificados Energéticos para edifícios** serão emitidos por entidades públicas ou privadas acreditadas para o efeito pelo Instituto Português da Qualidade (IPQ) e deverão ser afixados em local visível na entrada do edifício. Estes certificados deverão adoptar um aspecto gráfico semelhante ao das Etiquetas Energéticas para electrodomésticos, com as quais os consumidores, na sua maioria, já se encontram familiarizados. Os Certificados Energéticos deverão indicar os valores espectáveis do consumo energético e das emissões de CO_2 correspondentes (fig. 3.15).

NOME/LOGO DA ENTIDADE ACREDITADA
Edifício/Fracção:
Morada:
Área Útil de Pavimento:
Data de Emissão do Certificado:

SÍMBOLO DO SPQ
Aquecimento)
Tipo:
Arrefecimento)
Tipo:
AQS)
Tipo:
Iluminação)
Tipo:

A
B
C
D
E
F
G
H

B

Consumo Energético: kWh/m².ano
Emissões de CO_2: ton/ano

Válido até

Assinatura do auditor
(selo branco)

Figura 3.15 – Certificados Energéticos para edifícios

Com a **revisão do RSECE**, pretende-se que este regulamento não limite apenas a potência máxima dos sistemas de climatização, mas todos os consumos reais efectivos dos edifícios que dispõem deste tipo de sistemas, como única forma efectiva de controlar e reduzir os consumos de energia. Assim, para além da contabilização da energia consumida pelos sistemas de climatização, passará a ser contabilizada a energia consumida para outros fins, nomeadamente, a iluminação, os equipamentos, etc.

O novo RSECE passa a actuar em duas fases distintas: **na fase de projecto e na fase de funcionamento normal do edifício**.

Na fase de projecto, o novo RSECE deverá garantir três objectivos fundamentais (DGE, 2003):

(i) **O dimensionamento correcto das instalações de climatização**, semelhante ao processo contemplado pelo actual RSECE, mas devidamente actualizado tendo em conta as recentes normas europeias sobre o assunto;

(ii) **A concepção correcta dos sistemas primários fornecedores de energia e opções de utilização racional de energia**, avaliando a viabilidade económica de sistemas menos convencionais do tipo cogerações ou micro-cogerações, captações de energias renováveis, redes urbanas de distribuição de calor e/ou frio, para além dos sistemas já previstos pelo actual RSECE como a recuperação de calor, arrefecimento gratuito, gestão centralizada, repartição de potências, entre outros;

(iii) **A estimativa dos consumos energéticos do edifício**, obtida por metodologias simplificadas, que permitam obter uma ordem de grandeza do seu consumo global sob condições nominais previsíveis de utilização.

Como existem factores que influenciam significativamente o consumo do edifício, para além dos previstos e controláveis na fase de projecto do edifício, nomeadamente a influência dos próprios ocupantes, os hábitos de manutenção dos sistemas, etc., a regulamentação passará a incidir também **na fase de funcionamento normal do edifício após a conclusão da construção**. Só deste modo se conseguirá conhecer o consumo efectivo dos edifícios, que será a base das tomadas de decisão que terão como objectivo o controlo do consumo, para que este não ultrapasse valores que sejam considerados excessivos. O RSECE passará a actuar nesta fase através da introdução de um sistema de auditorias periódicas obrigatórias, tal como previsto na Directiva Europeia, acima de um limiar mínimo de consumos (ou área útil de pavimento), em princípio de 5 em 5 anos, para a emissão/renovação dos **Certificados Energéticos**.

3.2.1.5. Práticas aconselhadas para a redução do consumo energético na iluminação e electrodomésticos

A iluminação e os electrodomésticos, são responsáveis em média por 25% do consumo energético, tal como se pode observar na figura 3.16, sendo por isso necessário ter em conta, uma série de aspectos de modo a diminuir os consumos energéticos a este nível.

1) Iluminação

O consumo de electricidade na **iluminação** tem vindo a aumentar substancialmente nos últimos anos devido principalmente à construção de habitações com maiores áreas e à utilização de maior número de pontos de luz. A iluminação artificial de um espaço está intimamente relacionada com as suas dimensões, reflectância[1] das superfícies interiores e com a actividade que nele se desenvolve.

[1] Ver definição no glossário.

Um sistema de iluminação efectivo e eficiente deverá (AGO, 2003):

- **Assegurar** um elevado grau de conforto visual.
- **Utilizar** iluminação natural.
- **Assegurar** um nível de iluminação adequado à actividade.
- **Possibilitar** o controlo da iluminação dos espaços por zonas.
- **Possuir** baixo consumo energético.

A iluminação eléctrica no interior dos edifícios pode ser conseguida através de lâmpadas incandescentes, de halogéneo, de halogéneo de baixa voltagem, fluorescentes tubulares e fluorescentes compactas, com consumos energéticos distintos para níveis finais de desempenho exactamente iguais (figs. 3.16 e 3.17).

A eficácia luminosa[1] das lâmpadas, muitas vezes designada por "rendimento luminoso" (η), é caracterizada pela razão entre o fluxo luminoso (em lúmen) produzido e a energia eléctrica (em Watt) consumida pela lâmpada.

Lâmpadas incandescentes

Lâmpadas de halogéneo

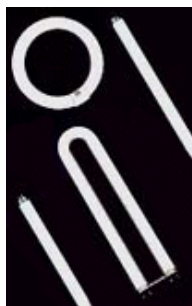
Lâmpadas fluorescentes compactas (L.F.C.)

Lâmpadas fluorescentes tubulares

Figura 3.16 – Tipos de lâmpadas utilizadas na iluminação artificial dos edifícios

[1] Ver definição no glossário.

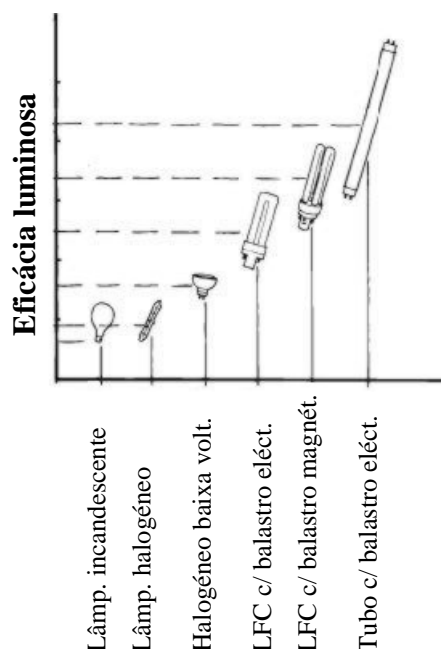



Figura 3.17 – Comparação da eficácia luminosa dos diferentes tipos de lâmpadas (fonte: AGO, 2003)

As **lâmpadas incandescentes** são o tipo de lâmpadas mais utilizado na iluminação artificial interior. Este tipo de lâmpadas é o mais barato, embora seja o menos eficiente e possua menor duração. Da energia que consomem, só 5 a 10% se transforma em energia luminosa, o que se traduz em custos de operação mais elevados. Toda a restante energia se transforma em calor. O seu rendimento luminoso é na ordem dos 12 lm/W.

As **lâmpadas de halogéneo** são também um tipo de lâmpadas incandescentes. Estas são mais caras do que as primeiras, possuindo no entanto maior durabilidade (cerca de 2000 horas). Existem lâmpadas que trabalham em corrente normal (220-240V) enquanto que outras trabalham em baixa tensão (é preciso usar um transformador para reduzir a tensão da rede). Estas últimas têm uma eficácia cerca de 15% superior às outras. O seu rendimento luminoso é na ordem dos 15 lm/W.

As **lâmpadas fluorescentes compactas** – LFC – podem possuir balastro electrónico ou balastro magnético (convencional). As que possuem balastro electrónico são mais eficientes do que as que possuem balastro convencional. Dependendo do tipo, as mais eficientes podem ter uma eficácia da ordem de 60 lm/W. Começam a ser bastante comuns na iluminação interior.

As **lâmpadas fluorescentes tubulares** são muito utilizadas na iluminação interior de edifícios de serviços e indústria. As lâmpadas fluorescentes tubulares, tal como as anteriores, precisam dum arrancador para funcionar. A maioria destas lâmpadas pode ser usada com balastro convencional ou electrónico. As que usam balastro electrónico são mais eficientes. A maioria é tubular simples (tem a forma dum tubo direito) embora existam lâmpadas circulares e em forma de "U". As últimas têm um diâmetro de 30mm ou 38mm e são as menos eficientes. A sua eficácia situa-se na gama de valores de 20 a 80 lm/W.

Para que a solução de iluminação dos edifícios seja eficiente, sugerem-se, entre outras, as seguintes práticas:

(i) **O tipo de iluminação mais eficiente é a iluminação natural**. Os edifícios devem ser concebidos de modo a que todos os compartimentos possuam iluminação natural, que pode ser conseguida através de janelas, clarabóias e tubos solares (fig. 3.18). O estudo dessas zonas para a entrada de luz natural deve ser realizado em conjunto com o projecto de características de comportamento térmico dos edifícios, pois essas zonas devem permitir a suficiente entrada de luz solar (natural) sem que com isso se comprometa o comportamento térmico dos edifícios.

(ii) **Preferir acabamentos de cor clara nas superfícies interiores e no mobiliário**. Os acabamentos de cor clara reflectem melhor a luz, o que reduz a quantidade de iluminação necessária.

(iii) A maior parte dos compartimentos necessitam de **dois tipos de iluminação**. A iluminação geral de um espaço fornece a iluminação necessária, por exemplo, à circulação dos seus utilizadores. No entanto, no mesmo espaço podem existir zonas onde seja necessária uma melhor iluminação, nomeadamente sobre uma secretária de trabalho, espaço de leitura, etc. Deve ser possível o controlo independente destes dois tipos de iluminação.

(iv) Existem no mercado várias lâmpadas com potências eléctricas distintas, devendo-se assegurar que se aplicam lâmpadas com **potência adequada à iluminação necessária**.

(v) O **tipo de lâmpada deve ser compatível com a utilização do espaço**. As lâmpadas fluorescentes devem ser aplicadas quando se necessite de iluminação artificial por longos períodos de tempo, como por exemplo, em salas de estar e sobre a banca da cozinha. De modo a que este tipo de lâmpadas possuam um tempo de vida mais dilatado, a maior parte delas necessitam cerca de um minuto para atingirem máximo brilho, logo não são adequadas para espaços onde se necessite de luz de imediato. Em compartimentos pouco utilizados ou utilizados por períodos curtos, como por exemplo, instalações sanitárias, despensas, lavandarias, as lâmpadas mais adequadas são as incandescentes.

(vi) Prever a existência de **vários circuitos de iluminação em cada espaço**, comandados por interruptores independentes. A existência de vários circuitos de iluminação independentes permite o controlo da quantidade de lâmpadas acesas num determinado momento. Utilizar um único interruptor para controlar todas as lâmpadas de um compartimento de elevadas dimensões é uma solução de iluminação ineficiente.

(vii) **Utilizar interruptores "inteligentes" em certos compartimentos** e em espaços exteriores. A utilização de interruptores de sensor de movimento é adequada em locais utilizados com pouca frequência e por curtos períodos de tempo, ou onde se preveja que exista grande probabilidade das lâmpadas ficarem acesas por esquecimento. No entanto, é necessário não esquecer que este tipo de interruptores

consume continuamente uma certa quantidade de energia, que pode ir até 10W em alguns casos.

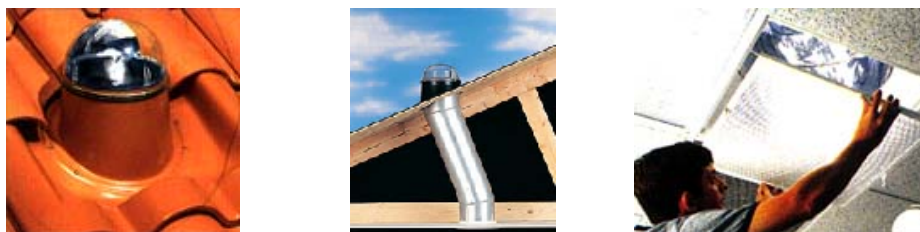



Figura 3.18 – Tubo solar (Solatube®)

2) Electrodomésticos

Os electrodomésticos, nomeadamente, os frigoríficos, arcas frigoríficas e as máquinas de lavar roupa, são responsáveis por uma elevada percentagem do consumo global de electricidade nos edifícios. Com a evolução tecnológica verificada nos últimos anos, e devido ao aumento do nível de vida das famílias portuguesas tem-se verificado o aparecimento de uma panóplia cada vez maior de novos electrodomésticos que passaram a ser integrados nos edifícios, o que se tem traduzido no aumento dos consumos de electricidade por esta via.

De modo a que o consumidor, na compra dos electrodomésticos, tenha maior informação acerca do consumo energético ao longo da sua vida foi criada, através da Directiva 92/75/CEE do Conselho, de 22 de Setembro de 1992, a etiquetagem energética dos electrodomésticos. A etiquetagem energética visa por um lado, incentivar os produtores a investirem na investigação, de modo a desenvolverem equipamentos mais eficientes e por outro alertar os consumidores que para além do custo inicial, o custo de funcionamento dos equipamentos é outra componente que não pode ser ignorada. Os equipamentos são classificados em sete classes energéticas diferentes (Classe A a G), em função da relação do seu consumo energético com a média dos consumos energéticos dos equipamentos do mesmo tipo (quadro 3.3 e fig. 3.19).

Quadro 3.3 – Classes energéticas dos electrodomésticos

Classe Energética (Avaliação)	Consumo de Energia	
A	<55%	Baixo consumo
B	55-75%	
C	75-90%	Consumo médio
D	90-100%	
E	100-110%	
F	110-125%	Alto consumo
G	+125%	

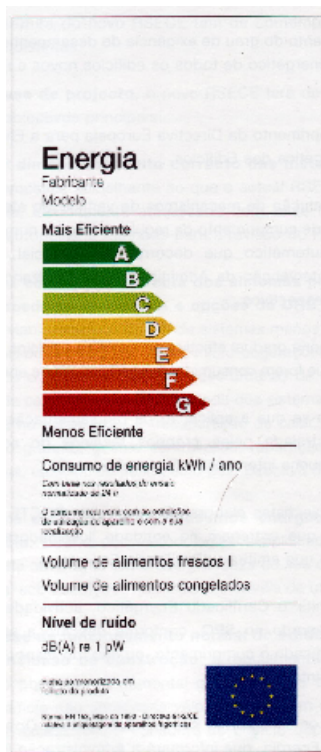



Figura 3.19 – Etiqueta energética de electrodomésticos

A etiqueta energética começou por ser obrigatória nos grandes electrodomésticos (frigoríficos, máquinas de lavar e secar), tendo sido alargada recentemente às lâmpadas e aos balastros para lâmpadas fluorescentes. É de todo conveniente que a curto prazo a obrigatoriedade da etiqueta energética seja alargada a outros equipamentos com consumo energético significativo, como sejam, os equipamentos para climatização (aquecedores, ar-condicionado, ventilação), fogões e fornos eléctricos, computadores pessoais, televisores, aparelhos hi-fi, entre outros, como forma de incentivar os consumidores a adquirir equipamentos que, em termos de custo inicial são mais onerosos, mas que em termos globais, durante o seu ciclo de vida (custos de aquisição e funcionamento), acabam por acarretar menores custos, para além de contribuírem para a resolução de um problema à escala global, através da redução das emissões de CO_2 para a atmosfera (Gonçalves *et al*, 2002).

3.2.1.6. Práticas aconselhadas para a redução do consumo energético na produção de água quente

O aquecimento de água é responsável em Portugal por aproximadamente 50% do total de consumos energéticos nos edifícios, contribuindo expressivamente para as emissões de CO_2 (fig. 3.4). Instalando o sistema de aquecimento de água mais eficiente e apropriado, tendo em conta o número de utilizadores e os padrões de utilização, é possível diminuir o consumo energético, com as adjacentes vantagens de redução dos custos em energia e diminuição da emissão de gases de efeito estufa, sem contudo comprometer o nível de conforto desejado. A maior parte da água

quente é utilizada nas instalações sanitárias, seguindo-se a cozinha como principal destino da água quente.

1) Sistemas convencionais de aquecimento de água

Existem dois tipos fundamentais de sistemas de aquecimento de água: **sistemas termoacumuladores** e **sistemas instantâneos**. Estes sistemas podem utilizar diversas fontes de energia para aquecer a água.

Os sistemas **termoacumuladores** armazenam a água aquecida num depósito fortemente isolado, para vir a ser utilizada à medida das necessidades. Por este motivo, ao contrário dos sistemas de aquecimento instantâneos, o seu funcionamento não está dependente da pressão de água existente na rede. No entanto, o aquecimento da água não é imediato, dependendo da potência e da capacidade do aparelho. É sempre necessário aguardar algum tempo até que a água aqueça e possa ser utilizada. Este sistema fornece uma quantidade de água regular a uma temperatura variável durante a utilização (fig. 3.20).

Os sistemas de aquecimento **instantâneos** (esquentadores) aquecem a água apenas no momento em que esta é necessária e não possuem depósito armazenamento. A água é aquecida num permutador exposto ao calor das chamas dos queimadores, pelo que a saída de água quente é instantânea. Para funcionar, estes aparelhos só necessitam de combustível, gás Propano, Butano ou Gás Natural e de alguma pressão de água na rede. Estes sistemas só conseguem fornecer água à temperatura desejada até um ou dois dispositivos sanitários ao mesmo tempo (fig. 3.21).

Figura 3.20 – Sistema termoacumulador eléctrico de aquecimento de água

Figura 3.21 – Sistema instantâneo a gás para o aquecimento de água

2) Sistemas solares para aquecimento de água

Os sistemas solares para o aquecimento de água são sistemas de aquecimento termoacumuladores. Estes sistemas utilizam a radiação solar para aquecer a água, podendo fornecer água quente, sem qualquer custo adicional para além da amortização do equipamento. Como a fonte de energia destes sistemas é o sol, a sua aplicação não é aconselhada em climas frios ou em áreas de fraca insolação.

Durante os dias nublados e principalmente durante o Inverno, ou quando a demanda de água quente ultrapassa a sua produção, o fornecimento de água quente é garantido através de um sistema de aquecimento auxiliar. A maior parte dos painéis solares vêm equipados com sistema de aquecimento auxiliar eléctrico ou a gás que, entra em funcionamento sempre que a energia solar não satisfaça as necessidades.

Neste tipo de sistemas, o colector solar e o tanque de armazenamento estão geralmente localizados na cobertura e orientados, no hemisfério Norte, para Sul. Para diminuir as perdas de calor no tanque de armazenamento, este pode ser instalado ao nível do desvão ou no piso térreo. Na figura 3.22 encontram-se representados os colectores solares para o aquecimento de água de um edifício onde o consumo de água quente é significativo.

Figura 3.22 – Sistema solar de aquecimento de água (Santa Casa da Misericórdia, Guimarães)

3) Sistema de aquecimento de água mais eficiente

Havendo no mercado tantos tipos de sistemas de aquecimento de água, o sistema de aquecimento mais adequado dependerá de vários factores:

(i) **Número de utilizadores do sistema**. A dimensão do agregado familiar e os seus hábitos, determinam a quantidade de água quente que será necessário produzir durante um dia, e por conseguinte influencia a dimensão e o tipo de sistema a escolher. Por exemplo, num agregado familiar de pequenas dimensões, em que o consumo diário de água quente é reduzido (até 80 litros), o sistema mais eficiente é o esquentador a gás ou o sistema termoacumulador a gás. Para um agregado familiar médio ou de grandes dimensões o sistema de aquecimento de água mais apropriado é o solar, desde que no local esteja garantida insolação solar suficiente (AGO, 2003).

(ii) **Custo do sistema**. Os custos de aquisição, de operação e de manutenção, bem como a vida útil estimada para cada um dos sistemas, são factores que devem ser observados na sua escolha. O custo de aquisição deste tipo de sistemas é bastante diferente, podendo ir desde cerca de € 150, no caso dos esquentadores, até cerca de € 2500 nos sistemas solares mais eficientes. A energia utilizada no aquecimento de água terá um impacto significativo na factura energética durante anos, pelo que os custos de operação destes sistemas não podem ser ignorados. Sistemas mais económicos são geralmente menos eficientes acarretando, por conseguinte, maiores custos de operação, quando o volume consumido de água quente é significativo. Por outro lado, os benefícios fiscais existentes para a aquisição de sistemas de aquecimento que utilizam energias renováveis não podem ser esquecidos: o governo português permite a dedução na colecta de IRS de 30% das importâncias dispendidas com a aquisição de equipamentos novos para energias renováveis, até ao limite máximo de € 700. A título de exemplo, apresenta-se um estudo realizado pela Agência Municipal para a Energia de Gaia (ENERGAIA), onde se compara o custo de aquecimento de água sanitária, tendo por base um consumo médio diário de cerca de 200 litros, e um período de amortização do equipamento de 12 anos. Neste estudo foi considerado que os colectores solares têm capacidade para suprir 80% das necessidades de água quente, sendo os restantes 20% assegurados por aquecimento eléctrico. Assim, foi considerado um consumo de energia eléctrica correspondente a € 37,41/ano neste tipo de sistemas. Como podemos observar pelo gráfico da figura 3.23, a médio/longo prazo o aquecimento de água utilizando energia solar é recompensador em termos económicos, ficando em média cerca de 30% mais económico do que os sistemas eléctricos. Para além dos custos financeiros, a escolha do sistema de aquecimento de água não pode ser alienada dos custos ambientais de cada um dos sistemas. O aquecimento solar de água é ainda mais vantajoso se se tiver em conta a emissão de gases poluentes associada a cada um dos sistemas. Como já se viu anteriormente, o dióxido de carbono é um dos gases mais prejudiciais no que diz respeito ao chamado efeito estufa e consequentemente às alterações climáticas. Assim, os custos ambientais serão tão menores quanto menor for a emissão de CO_2 associada a cada uma das soluções. O gráfico da figura 3.24 apresenta a produção média de CO_2 associada a cada uma delas. Segundo o GASA, (Grupo de Analise de Sistemas Ambientais) da Universidade Nova de Lisboa, a instalação de 1 600 000 painéis

solares até 2010 permitirá obter um potencial de redução de 396 000 toneladas de CO_2, o que representa 4,4 % das emissões do sector residencial. A utilização de sistemas de captação de energia solar para o aquecimento de água, para além de ser uma medida de eficiência económica é uma medida de protecção ambiental e de preservação dos recursos naturais e minerais.

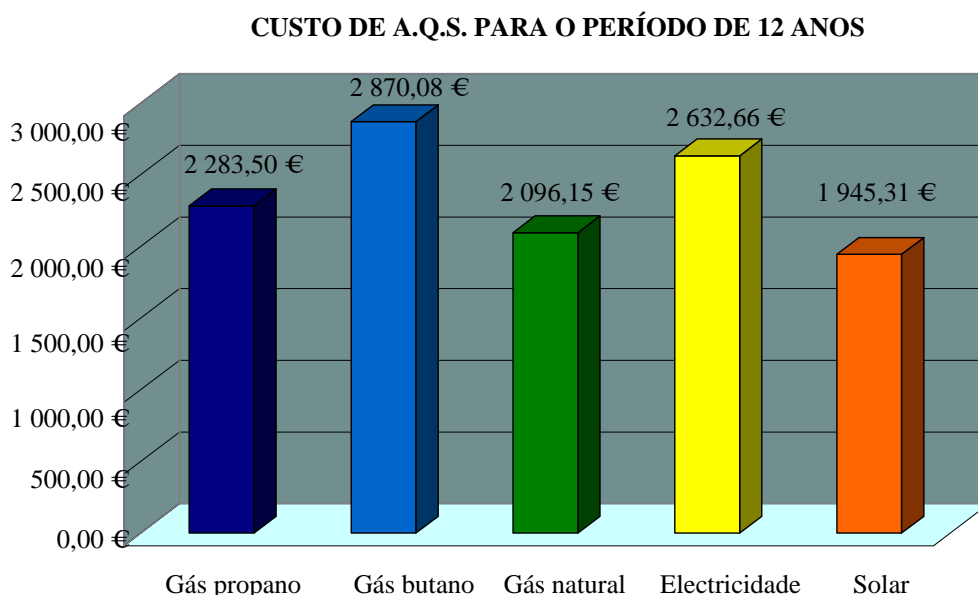



Figura 3.23 – Custos de aquecimento de água sanitária para período de amortização do equipamento de 12 anos (fonte: ENERGAIA, 2003)

(iii) **Espaço disponível**. Em edifícios já construídos será difícil implantar certos tipos de sistemas devido à ausência de espaço disponível. Existem sistemas que ocupam menos espaço do que outros, pelo que o espaço disponível influência a escolha do sistema. Por outro lado, existem sistemas que não podem ser aplicados em certos casos. Por exemplo, a utilização de painéis solares em edifícios de habitação está limitada às vivendas ou aos fogos situados no último andar de um prédio.

(iv) **Aquecedor de água existente**. Em obras de reconversão, alguns sistemas de aquecimento podem ser substituídos facilmente por outros mais eficientes. Por exemplo, é fácil converter os antigos sistemas de fornecimento de água por gravidade a partir de um reservatório situado na cobertura, em que o aquecimento de água se realiza em termoacumulador eléctrico de baixa pressão, por um sistema de aquecimento solar montado na cobertura, com poucas alterações na rede de abastecimento de água.

EMISSÕES DE CO_2

Solar
Electricidade
Gás natural
Gás butano
Gás propano

0 20 40 60 80 100 120 140 160

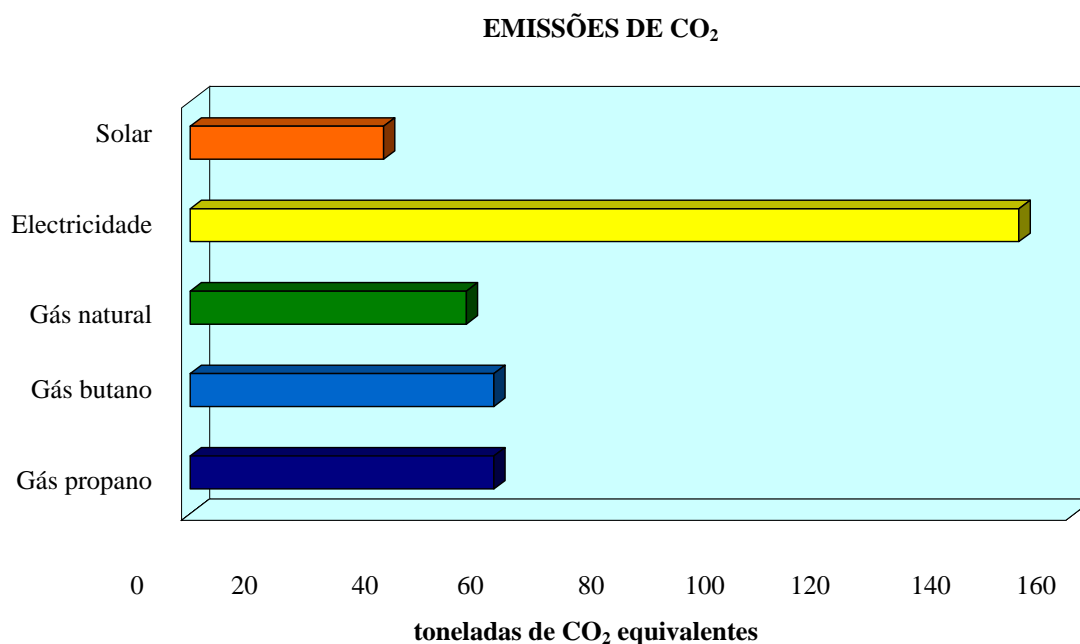
toneladas de CO_2 equivalentes

Nota: Para o cálculo das emissões são contabilizadas as emissões resultantes da produção de electricidade e da refinição e armazenamento, no caso de produtos petrolíferos.

Figura 3.24 – Emissões de CO_2 associadas a cada uma das fontes de energia para a produção de AQS (fonte: ENERGAIA, 2003)

(v) **Fontes de energia disponíveis**. A utilização de certos tipos de sistemas de aquecimento de AQS é condicionada pelas fontes de energia disponíveis no local. Por exemplo, a implementação de sistemas de aquecimento cuja fonte de energia é o gás natural, está limitada aos locais onde existe rede de distribuição deste gás, e a energia solar pode não ser ideal em climas frios ou áreas pouco insoladas. Ao nível da implementação de AQS solar em Portugal não existem grandes problemas, pois estes sistemas têm capacidade para aquecer a água durante praticamente todo ano, devido ao elevado número de dias com sol. Portugal, a par da Grécia e Espanha, é dos países com maior potencial de aproveitamento de energia solar na Europa. Com mais de 2300 horas/ano de insolação na Região Norte e 3000 no Algarve, Portugal dispõe de uma situação privilegiada para o desenvolvimento da energia solar. O aproveitamento da energia solar passa não só pela instalação de painéis solares, mas também pela construção de edifícios tecnicamente bem concebidos, que permitam significativas poupanças energéticas. As instalações solares térmicas existentes em Portugal, estão ligadas quase exclusivamente ao aquecimento de águas. Em Portugal, um metro quadrado de área de colector solar, poderá resultar em mais de 1000 kWh de energia térmica por ano.

3.2.1.7. Sistemas de produção doméstica de electricidade a partir de fontes renováveis

O consumo de energia eléctrica convencional nos edifícios pode ainda ser reduzido se se aplicarem sistemas que permitam a produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis. Este tipo de sistemas utiliza **fontes de energia renovável**, como o sol, o vento, e a água, para produzirem electricidade com baixa emissão de GEE's.

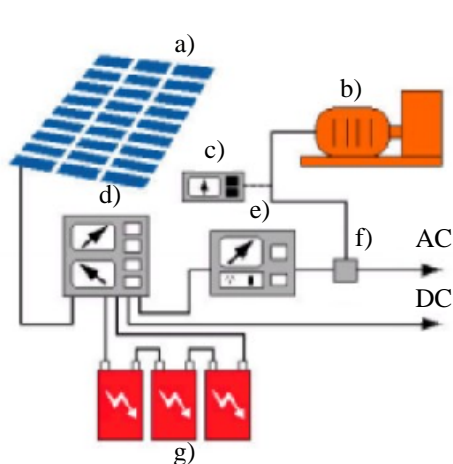
Como o rendimento destes sistemas está intimamente relacionado com as condições climatéricas é necessário prever a instalação de sistemas auxiliares que garantam o fornecimento de electricidade independentemente das condições climatéricas, como por exemplo, geradores a gasóleo, ou prever a ligação do edifício à rede de distribuição eléctrica, pelo que a produção de GEE's apesar de ser menor não poderá ser totalmente evitada.

Este tipo de sistemas apesar de estarem associados a custos de operação bastante reduzidos, os seus custos de aquisição são bastante elevados, pelo que se deverá avaliar os custos associados à totalidade do seu ciclo de vida: custos de instalação e operação. Por outro lado, é preciso não esquecer que o custo da energia produzida por esta via se mantém inalterado, face ao esperado aumento acentuado das tarifas de energia eléctrica. A principal desvantagem destes sistemas é que o seu projecto, a sua instalação e manutenção são complexos pelo que deverão ser executados por técnicos altamente qualificados.

Existem vários tipos de sistemas para a produção doméstica de electricidade a partir de fontes renováveis, destacando-se os **painéis solares fotovoltaicos**, as **micro-turbinas eólicas** e os **micro-hidrogeradores**.

1) Painéis solares fotovoltaicos

Os **painéis solares fotovoltaicos** são constituídos por módulos que convertem directamente a energia solar em electricidade. Estes não apresentam partes móveis, pelo que são fiáveis e requerem baixa manutenção. A vida útil esperada para um painel solar fotovoltaico é actualmente de 20 anos ou mais. Este tipo de sistema torna-se adequado a zonas urbanas, pois permite a produção de electricidade sem emissão de ruído e ocupa pouco espaço. Na figura 3.25 apresenta-se o esquema de uma instalação fotovoltaica completa.

As **células solares** utilizadas nos painéis solares fotovoltaicos são geralmente mono-cristalinas, poli-cristalinas ou silico-amorfas. As mono-cristalinas são as que possuem maior rendimento – transformam cerca de 20% da energia solar incidente em energia eléctrica – sendo também as mais caras, enquanto que as silício-amorfas são as de menor rendimento – cerca de 10% – sendo, em contrapartida as mais baratas. Cada painel solar fotovoltaico pode produzir até 60 W, com uma tensão de 6 a 12 V.

Legenda

a) Painéis solares fotovoltaicos;

b) Sistema auxiliar (opcional);

c) Sistema de regulação do sistema auxiliar;

d) Sistema de regulação da potência dos painéis;

e) Conversor de DC – AC;

f) Sistema de ligação;

g) Sistema de armazenamento de electricidade (baterias).

Figura 3.25 – Esquema de uma instalação fotovoltaica completa (fonte: CEEETA, 2004)

Os módulos são na maior parte das vezes fornecidos em caixilhos, geralmente de alumínio anodizado (fig. 3.26). Estão a ser desenvolvidos e produzidos módulos solares sob a forma de material de construção que podem ser integrados nos diversos componentes de um edifício: telhas fotovoltaicas (fig. 3.27); painéis de cobertura fotovoltaicos (fig. 3.28); painéis de parede fotovoltaicos; envidraçados semi-translucidos.

Figura 3.26 – Módulos solares fotovoltaicos em caixilhos de alumínio (fonte: CEEETA, 2004)

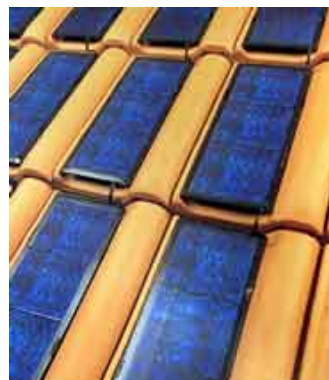



Figura 3.27 – Exemplos de telhas fotovoltaicas

Figura 3.28 – Painéis de cobertura fotovoltaicos (THYSSEN-Solartec®)

Figura 3.29 – Painéis de fachada fotovoltaicos (THYSSEN-Solartec®)

Figura 3.30 – Envidraçados semi-translucidos fotovoltaicos (Saint Gobain Glass-Prosol®)

2) Micro-turbinas eólicas

As **turbinas eólicas**, também conhecidas por **aerogeradores**, transformam a energia cinética do vento em energia mecânica e consequentemente em energia eléctrica. Existem vários tipos de aerogeradores, que variam na forma e no tamanho. O mais comum é o de turbina de eixo horizontal com pás, que é similar à hélice de um avião (fig. 3.31). **Os aerogeradores não são apropriados a zonas urbanas**, pois a turbina têm de ser montada numa torre e produz algum ruído no seu funcionamento.

Os aerogeradores domésticos são geralmente sistemas autónomos de produção de electricidade e são projectados para carregar um conjunto de baterias. **Os aerogeradores produzem energia alternada a diferentes voltagens** – em função da velocidade do vento. É assim, necessário rectificar a energia produzida na voltagem correcta para o carregamento das baterias. Este processo é semelhante ao que ocorre nos automóveis.

Na maior parte das vezes, a **potência dos aerogeradores** domésticos varia na gama dos 300 W aos 5 000 W, mas em alguns casos podem-se utilizar turbinas de 10 000 W a 20 000 W

Figura 3.31 – Aerogerador doméstico de turbina horizontal com pás

2) Micro-hidrogeradores

Os **micro-hidrogeradores** transformam a energia mecânica da água em movimento em energia eléctrica. Com uma adequada fonte de água, os micro-hidrogeradores são uma fonte de energia mais fiável do que os geradores solares ou do que as micro-turbinas eólicas, pois o rendimento deste é menos dependente das condições climatéricas.

Os micro-hidrogeradores domésticos podem produzir corrente contínua (DC) ou corrente alternada (AC). Os de corrente alternada são projectados para carregar uma série de baterias, a partir das quais e depois de se converter a energia em energia alternada, se fornece o edifício. As unidades AC estão preparadas para satisfazer directamente as necessidades energéticas do edifício.

Estes sistemas podem ser instalados em terrenos atravessados por ribeiros, em locais com nascentes de água situadas numa encosta (fig. 3.32), em furos artesianos com adequada pressão, ou podem ser instalados em série com o ramal de abastecimento de água de um edifício (fig. 3.33).

A **potência dos micro-hidrogeradores** DC varia na gama dos 100 W aos 3 000 W, enquanto que as unidades AC atingem potências na gama dos 300 W aos 20 000 W (AGO, 2003).

Figura 3.32 – Sistema micro-hidrogerador instalado numa nascente situada numa encosta (fonte: AGO, 2003)

Figura 3.33 – Sistema micro-hidrogerador aplicado em série com o ramal de abastecimento de um edifício (fonte: AGO, 2003)

3.2.2. Matérias-Primas (materiais)

3.2.2.1. Enquadramento

Para se realizarem as construções, o Homem retira os materiais de variadas fontes que o rodeiam, concentrando-os num local específico. Estes materiais são posteriormente processados e ensamblados de modo a constituírem as envolventes que o protegerão dos elementos climáticos e de outros organismos hostis. É indiscutível que qualquer actividade construtiva comporta a utilização, redistribuição e concentração de algum recurso energético ou material da Terra numa determinada área específica, alterando a ecologia dessa parte da biosfera e desequilibrando o ecossistema local.

Como já se referiu anteriormente, a indústria da construção é um dos maiores consumidores de recursos naturais, tendo por isso grande responsabilidade na delapidação desses recursos e, por conseguinte, na degradação do meio ambiente. A construção de edifícios é actualmente responsável pelo consumo de 25% da madeira e 40% dos agregados (pedra, brita e areia) que se verifica em todo o mundo (Ngowi, 2000).

Os materiais de construção são extraídos e transportados até aos locais de aplicação em distâncias que podem chegar a ser intercontinentais. Assim, os recursos incorporados nas

construções não estão apenas relacionados com o peso dos materiais utilizados, mas também com a energia proveniente de fontes não renováveis, consumida na sua extracção, processamento, armazenamento, transporte para o local de construção, montagem e construção em obra. Para além destes, existem outros factores relacionados com os materiais e sistemas construtivos utilizados, como a energia necessária à manutenção das condições de conforto interior, futura reciclagem, reutilização ou reintegração ecológica.

O impacto que determinados materiais apresentam para a saúde dos ocupantes dos edifícios e para os ecossistemas não pode ser ignorado, devendo-se analisar previamente a toxidade de cada um dos materiais a utilizar.

Por estas razões, é na fase de projecto que deverão ser tomadas as decisões que tenderão a mitigar os impactes produzidos na utilização dos materiais na construção. Este objectivo só se consegue atingir através da integração de todas os factores referidos anteriormente nas diversas tomadas de decisão. É da responsabilidade dos diversos decisores que intervêm na fase de projecto (Promotor, Empreiteiro, Equipa de Projecto, etc.) a criação de um edifício como uma forma de gestão de energia e materiais, de modo a que este contribua na gestão prudente dos recursos.

Assim, a equipa de projecto, deverá adoptar uma série de estratégias de modo a seleccionar os materiais que vai utilizar nas suas construções. Para além dos critérios arquitectónicos comuns (estética), a selecção deverá ainda compreender os seguintes critérios:

- **Energia incorporada no material**. Deve-se ter em conta o custo energético relacionado com a energia incorporada no material durante a totalidade do seu ciclo de vida;
- **Impacte ecológico incorporado no material**. Os materiais possuem impacte no meio ambiente como consequência da sua extracção, produção e transporte até à obra;
- **Potencial de reutilização e reciclagem dos materiais**, como consequência do desgaste a que estão sujeitos durante o seu ciclo de vida;
- A **toxidade do material** para os seres humanos e ecossistemas;
- Os **custos económicos** associados ao ciclo de vida dos materiais (custo inicial, custo de manutenção e custo de demolição/desmantelamento.

3.2.2.2. Energia incorporada no material

A energia incorporada nos materiais corresponde à quantidade de energia necessária para a sua produção, transporte, aplicação na obra, manutenção e demolição. Esta energia pode variar entre 6 a 20% da quantidade total de energia consumida durante a vida útil de um edifício, dependendo, entre outros factores, dos sistemas construtivos utilizados, do número de utilizadores do edifício, do grau de conforto exigido pelos ocupantes e do clima do local. Cerca de 80% deste valor, corresponde à Energia Primária Incorporada (PEC) dos materiais (*do inglês* PEC – *Primary Energy Consumption*). A PEC corresponde aos recursos energéticos consumidos

durante a produção dos materiais, incluindo a energia directamente relacionada com a extracção das matérias-primas, com o seu transporte para os locais de processamento e com a sua transformação (Berge, 2000). Na figura 3.34 encontra-se representado o ciclo de vida dos materiais e os consumos energéticos associados. O quadro 3.4 apresenta a PEC média de alguns dos materiais de construção mais utilizados.

Legenda

a) Fase de extracção das matérias-primas;

b) Fase de produção;

c) Fase de transporte para o estaleiro de obras;

d) Fase de construção;

e) Fase de manutenção;

f) Fase de demolição;

g) Reutilização;

h) Reciclagem;

i) Deposição/eliminação;

j) Energia total incorporada nos materiais – 6 a 20% do total de energia consumida durante a totalidade do ciclo de vida de um edifício;

k) Energia primária incorporada dos materiais (PEC) – 80% de a);

l) Energia incorporada nos materiais nas fases de transporte, construção, manutenção e demolição – 20% de a).

Figura 3.34 – Ciclo de vida dos materiais de construção e consumos energéticos associados

Os restantes 20% incluem a energia consumida durante o transporte dos materiais de construção para o estaleiro de obra, a necessária durante a fase de construção para os processos de elevação e montagem, para os processos de manutenção e reabilitação dos elementos de construção e a necessária para as operações de desmantelamento e demolição dos edifícios no final do seu ciclo de vida.

Os valores de PEC apresentados possuem uma elevada margem de erro pois dependem de uma série de factores, entre os quais se destacam: a eficiência do processo de transformação; o tipo de combustível utilizado no processo de transformação das matérias-primas e no seu transporte; a distância de transporte das matérias-primas; a quantidade de matéria reciclada utilizada. Assim, o valor da PEC não é constante, variando de país para país e mesmo dentro de cada país, de região para região, e também de autor para autor, dependendo das variáveis consideradas.

Quadro 3.4 – Consumo de energia primária (PEC) de alguns materiais de construção (fontes: Berge, 2000 e outras)

Material	PEC (kWh/kg)
Aço (não reciclado)	8,89
Aço (reciclado)	2,77
Alumínio (não reciclado)	4,80
Alumínio (reciclado)	51,11
Argamassa de cimento	0,28
Argila (telhas cerâmicas)	0,83
Argila (tijolo cerâmico)	0,83
Betão	0,28
Gesso cartonado	1,39
Lã mineral	4,45
Madeira laminada	1,11
Poliestireno extrudido(XPS)	20,00
Tela asfáltica	4,06
Vidro (não reciclado)	2,22
Vidro (reciclado)	1,78

De forma a se reduzir a energia incorporada nos edifícios através dos materiais de construção, devem ser observados os seguintes critérios na sua selecção:

(i) **Preferir os produtos locais.** Está provado que uma parte importante da energia incorporada num material está associada ao seu transporte até à obra. Assim, em igualdade de circunstâncias, deve-se preferir materiais de construção produzidos na região pois, terão que percorrer distâncias mais curtas que os procedentes de locais mais longínquos;

(ii) **Utilizar materiais com elevado potencial de reutilização e/ou grande durabilidade**. A ideia de que os materiais de baixa energia são preferíveis aos materiais de alta energia incorporada nem sempre é correcta. Na análise comparativa e selecção dos materiais deve-se ter em conta a totalidade do seu ciclo de vida (LCA – *Life Cycle Assessment*). A selecção de um material com maior quantidade de energia incorporada pode ser mais vantajosa desde que o seu ciclo de vida seja mais alargado, pois o custo ambiental associado à energia incorporada acaba por ser amortizado num maior número de anos. Por outro lado, serão preferíveis os materiais que possam ser directamente reutilizados sem passar por processos de transformação com custos energéticos;

A construção em betão armado tem praticamente a mesma quantidade de energia incorporada que a de aço, mas é no entanto menos reciclável no final da sua vida útil. Em geral, o aço estrutural pode ser reciclado e/ou reutilizado a 100%, podendo ser de novo utilizado como elemento estrutural, enquanto que a maior parte do betão só pode ser reutilizada sobre uma forma degradada (por exemplo, como agregado) e só com grandes limitações pode ser reciclado outra vez para a sua função estrutural (Yeang, 2001).

(iii) **Utilizar materiais/sistemas de construção de baixa massa**. Como a quantidade de energia incorporada num material/sistema de construção está relacionada com a sua massa, em geral quanto menor for a massa de um edifício, menor será a quantidade de energia incorporada. A construção leve, como por exemplo, a construção em madeira, possui menor energia incorporada do que a construção em betão armado.

A título de exemplo, refere-se o consumo de energia associado à produção em Portugal de alguns dos materiais de construção mais utilizados. O cimento é um dos materiais mais utilizados na construção portuguesa. As indústrias responsáveis pelo fabrico do cimento consomem cerca de 11% da energia total consumida pela indústria transformadora, o que equivale ao consumo médio anual de aproximadamente 0,9 Mtep. Também na indústria da cerâmica e do vidro, cujos maiores clientes são as empresas de construção, é consumida uma elevada quantidade de recursos energéticos, sendo este sector responsável pelo consumo de 15,7% da energia consumida pela indústria transformadora, o que equivale ao consumo anual de aproximadamente 1,3Mtep (DGE - Balanço Energético Nacional, 2000).

Apesar da quantidade de energia incorporada num material de construção ser um indicador chave para a selecção dos materiais num projecto responsável para com o meio ambiente, este indicador não pode ser estudado independentemente de outros factores, como por exemplo, o comportamento passivo dos edifícios. Como já se mencionou anteriormente, a energia incorporada num edifício corresponde no máximo a 20% da energia total consumida durante a sua vida útil, pelo que, a maior quantidade de energia está associada ao seu funcionamento. Assim, apesar de ser importante a selecção de materiais de baixa energia incorporada, não se pode esquecer o comportamento passivo do edifício. A selecção de um material com baixa energia incorporada e com mau comportamento térmico compromete os objectivos do projecto ecológico, pois o consumo energético durante a sua vida útil do edifício acaba por ser maior.

Quando se compara a energia incorporada de soluções construtivas diferentes, o importante não é comparar a energia por unidade de massa ou de volume. A comparação deve ser realizada ao nível de cada “unidade funcional” do edifício, isto é, ao nível de cada elemento com funções similares. A título de exemplo, apesar do aço, como se pode observar no quadro 3.4, apresentar a PEC por unidade de massa mais alta que o betão armado, a sua resistência, em contrapartida, é consideravelmente superior. Será assim necessária uma menor massa de aço de que de betão para realizar a mesma função estrutural, pelo que a energia incorporada no edifício poderá ser menor.

3.2.2.3. Impacto ecológico incorporado no material

O impacto ecológico incorporado reflecte o impacto ambiental do material ou componente da construção (tanto local como globalmente) que decorre em toda a cadeia de actividades que se desenvolvem desde a extracção das matérias-primas até à sua montagem no edifício. Como indicador deste impacto normalmente costuma-se utilizar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) (Howard *et al.*, 1995*)*. Este indicador denomina-se por **Potencial de Aquecimento Global (PAG)** e mede-se em gramas equivalentes de CO_2.

O CO_2 é, como já se referiu, um dos gases com maior responsabilidade nas alterações climáticas. A sua produção está associada à combustão de combustíveis fósseis que tem lugar em algumas actividades a que o material está sujeito. No quadro 3.5 encontra-se representada a emissão de CO_2 associada a alguns dos materiais de construção mais utilizados.

Quadro 3.5 – Potencial de Aquecimento Global (PAG) associado a alguns materiais de construção (fonte: Berge, 2000)

Material	PAG (g/kg)
Aço (reciclado)	557
Alumínio (reciclado)	11 102
Argamassa de cimento	98
Argila (telhas cerâmicas)	190
Argila (tijolo cerâmico)	190
Betão	65
Gesso	265
Lã mineral	1076
Madeira laminada	277
Poliestireno extrudido (XPS)	1 650
Tela asfáltica	751
Vidro	569

No entanto, as emissões de CO_2 não são o único impacto ambiental relacionado com o material, devendo ser analisados outros factores como a **contaminação dos cursos de água**, **delapidação dos recursos naturais** e os **custos energéticos no seu transporte**.

Durante as fases de extracção e produção dos materiais, existem certos materiais que produzem impactes significativos sobre os cursos de água, principalmente devido aos produtos químicos utilizados. Como certos materiais podem ser fabricados de diferentes maneiras e com diversos graus de efeito contaminante, será em primeiro lugar preferível e sempre que possível, a selecção de materiais com baixo efeito contaminante, seguida pela selecção de produtos que advém de indústrias com melhor gestão ambiental. Por exemplo, devem-se preferir as empresas que utilizam a água oxigenada para branquear o papel, em detrimento daquelas que utilizam o Hipoclorito de Sódio (lixívia).

Com a grande procura de matérias-primas que se assiste na Indústria da Construção, verifica-se a diminuição acentuada das reservas de certas fontes de materiais. No entanto, existem ainda

algumas fontes que ainda não estão totalmente exaustas ou que possuem reservas abundantes, pelo que se deve preferir materiais provenientes dessas fontes. Um exemplo de um recurso abundante em toda a superfície terrestre e com elevadas potencialidades na Construção é a pedra. A utilização de aço não reciclado e de cobre deve ser limitada pois, atendendo ao ritmo actual e previsto de extracção da matéria-prima, estima-se que as reservas do primeiro só estão garantidas por mais cerca de 20 anos e as do segundo por mais cerca de 35 anos (Berge, 2000). O quadro 3.6, apresenta uma estimativa para a duração das reservas de matéria-prima associadas a alguns dos materiais de construção mais utilizados.

Quadro 3.6 – Número estatístico de anos esperado até à exaustão das fontes de matéria-prima associadas a alguns dos materiais de construção mais utilizados (fonte: Berge, 2000)

Material	Duração (anos)
Aço não reciclado	21
Aço (100% reciclado)	(-)[1]
Alumínio (50% reciclado)	220
Argamassa de cimento	(-)[1]
Argila (telhas cerâmicas)	(-)[1]
Argila (tijolo cerâmico)	(-)[1]
Betão	(-)[1]
Gesso	(-)[1]
Lã mineral	390
Madeira laminada	390
Poliestireno extrudido(XPS)	40
Tela asfáltica	40
Vidro	(-)[1]

A quantidade de água utilizada pelos materiais ou sistemas construtivos é também um factor que deve influenciar a selecção. Como a água é um bem cada vez mais escasso em grande parte do globo, cabe aos projectistas a selecção de materiais e sistemas construtivos que utilizem pouca água.

Os danos colaterais associados à escavação e extracção dos minerais também não podem ser ignorados, pois existem certos minerais, como por exemplo, o ouro e o alumínio, que para serem extraídos podem produzir graves danos no ecossistema local.

3.2.2.4. Potencial de reutilização e reciclagem

A selecção dos materiais deve-se basear no seu potencial de reutilização e reciclagem. Depois do material completar o seu ciclo de vida inicial, este possui um determinado potencial de reutilização e reciclagem que é função da sua capacidade de vir a ser utilizado novamente como

---

[1] Nota: Para alguns materiais, é difícil estimar o número de anos até à sua exaustão pois, as suas fontes são ainda abundanentes ou porque existem factores dificilmente quantificáveis que influenciam a sua duração.

recurso. O conhecimento da potencialidade de reutilização e reciclagem de um material é bastante importante na gestão racional dos recursos e produtos de um edifício que apresenta como objectivos a redução do impacte das construções sobre o meio natural; e sempre que possível procura renovar, restaurar e melhorar o meio ambiente. Para que estes objectivos sejam conseguidos, na selecção dos materiais devem-se preferir aqueles que possuem maiores potencialidades de reutilização àqueles com algumas potencialidades de reciclagem, pois a reutilização directa consume menor quantidade de energia, embora ambas evitem a descarga de produtos no meio ambiente.

É preferível dar maior ênfase, na selecção dos materiais, à sua capacidade de reutilização e reciclagem em detrimento da energia incorporada. Quanto mais vezes se utiliza um material ou componente, mais baixo será o custo de energia incorporada, pois este acaba por ser amortizado no número de utilizações do material.

A maior parte dos materiais de construção pode ser reciclada. Posteriormente, apresentam-se algumas soluções para a reciclagem de metais, plásticos, vidro, madeira, betão e materiais cerâmicos. A quantidade de soluções é na realidade muito maior e todos os dias surgem novas soluções, devido às investigações que se vão desenvolvendo neste domínio.

(i) Os **metais** são recicláveis se for possível separá-los por tipo. Os elementos de construção em **aço e em alumínio possuem elevado potencial de reciclagem**. É actualmente possível a produção de perfis de aço laminados e de aço em varão a partir de matéria-prima 100% reciclada. Com a actual tecnologia de reciclagem do aço é possível reduzir entre 50% a 70% o consumo energético e emissão de gases poluentes na sua produção. O alumínio é também 100% reciclável e com a sua reciclagem é possível diminuir a energia incorporada e a emissão de gases poluentes em cerca de 90% (Tshudy, 1996).

(ii) A maior parte dos **plásticos** podem ser granulados e reciclados na produção de novos produtos de plástico. No entanto, as taxas actuais de reciclagem são bastante baixas devido principalmente à elevada variedade de plásticos e à dificuldade que existe em os separar. A título de exemplo, o Polietileno de Elevada Densidade (PED) pode ser reciclado para a realização de caixotes de lixo, baldes, cones de tráfego, etc. Os aditivos, protecções e os corantes utilizados na produção dos plásticos dificultam a sua reciclagem.

(iii) Os produtos de **vidro** podem ser reciclados se devidamente separados e não contaminados. O vidro da construção deve ser separado do vidro proveniente do lixo doméstico (garrafas, etc.). Actualmente a reciclagem do vidro existente nos resíduos da construção é pouco praticada. O vidro pode ser directamente reutilizado ou reciclado, por exemplo, como agregado, depois de granulado, para a execução do betão. Com a reciclagem do vidro é possível reduzir a sua energia incorporada em 20% (AGO, 2003).

(iv) Os produtos em **madeira** podem ser facilmente reutilizados se estiverem em bom estado de conservação: portas e janelas de dimensões *standard* podem facilmente vir a ser reutilizadas noutras construções; elementos estruturais em madeira podem vir a ser facilmente reutilizados se estes estiverem ligados de modo a que sejam facilmente

desmontados. Caso o estado de conservação dos produtos em madeira não seja o melhor, a sua valorização energética é uma solução possível.

(v) O **betão** e os **produtos cerâmicos** (tijolos e telhas) são exemplos de materiais cuja recuperação e reutilização é difícil. Os elementos em betão, tal como os produtos cerâmicos**,** depois de britados podem ser reciclados em agregados para o fabrico de betão, ou podem ser utilizados na execução de caixas de pavimento em pisos térreos ou nas bases de estradas.

3.2.2.5. Toxidade do material

A toxidade de um material expressa os efeitos nocivos que este pode infligir no ser humano e no ecossistema que o rodeia. Cada material, produto ou componente a utilizar num edifício deve ser devidamente analisado, em especial, as suas especificações técnicas e o seu processo de fabrico com vista à identificação de compostos químicos que sejam tóxicos.

A fraca qualidade do ar no interior dos edifícios é causada por fontes interiores e exteriores de emissões gasosas e partículas sólidas, e surge quando a produção destes elementos excede a capacidade dos sistemas de ventilação e filtragem em diluir ou remover esses poluentes até a um nível aceitável. Apesar da maioria dos poluentes ter origem no exterior e nas actividades que se desenvolvem no interior pelos ocupantes e equipamentos, existem outros poluentes emitidos a partir dos materiais e que podem influenciar significativamente a qualidade do ar interior.

A exposição aos poluentes interiores coloca sérios riscos à saúde dos ocupantes. Existem uma série de doenças e sintomas que poderão estar relacionados com a qualidade do ar interior, como por exemplo, as dores de cabeça, cansaço, tosse, irritação do nariz dos olhos e garganta, a asma e até o cancro.

Os diversos tipos de poluentes produzidos no interior do edifício e que contribuem para degradação da qualidade do ar interior são (Bernheim, 1996):

(i) **Compostos orgânicos voláteis (COV)**, **emitidos pelos materiais**, **componentes** e **mobiliário** existente no interior do edifício;

(ii) Os **COV emitidos pelos produtos de limpeza e de manutenção** utilizados no interior do edifício;

(iii) As **fibra**s que se desagregam de produtos têxteis e de sistemas de isolamento;

(iv) **Poeiras de terra**, **materiais biológicos** (por exemplo, fungos e bactérias), e os **gases** libertados pela actividade biológica;

(v) **Pó e outras partículas** libertadas pela utilização de aerossóis e nas operações de acabamento/manutenção de certos materiais e componentes (raspagem, lixagem, etc.).

Na constituição dos materiais e componentes de construção pode ser empregue uma panóplia de produtos químicos. A maior parte desses químicos, por serem recentes, ainda não se encontram

suficientemente estudados pelo que não se conhecem os efeitos na saúde dos ocupantes. Mais grave e ainda menos conhecido é o efeito cumulativo e interactivo da exposição aos compostos químicos, pois existem doenças que se manifestam passado um longo período após a exposição e existem compostos que isoladamente não apresentam qualquer perigo mas que em combinação com outros apresentam riscos para a saúde.

Estabelecer o conteúdo tóxico de um material pelo conhecimento da quantidade de compostos químicos, regime de emissões de gases que podem ser transmitidos aos ocupantes do edifício e de outras características potencialmente perigosas, não é uma ciência exacta. Nos Estados Unidos, os fabricantes foram obrigados a editar folhas de dados sobre a segurança dos materiais (MSDS – *Materials Safety Data Sheets*), o que constitui o primeiro passo na determinação da presença de produtos químicos prejudiciais nos produtos. As folhas MSDS são disponibilizadas pelos fabricantes a pedido do cliente e contêm uma listagem dos compostos químicos que se encontram nos produtos e respectivos riscos conhecidos para a saúde, cuidados a ter no seu manuseamento, procedimentos de desintoxicação, etc. A informação contida nas folhas MSDS pode ainda ser cruzada com outros manuais sobre toxicologia e com a lista de agentes cancerígenos disponibilizada pela Agência Internacional de Investigação do Cancro. O quadro 3.7 apresenta algumas substâncias que podem ser encontradas nos materiais e componentes de construção e os seus efeitos na saúde dos ocupantes dos edifícios.

É da responsabilidade dos projectistas a selecção de materiais e componentes de baixa toxidade, de modo a evitar que a sua utilização afecte a saúde e produtividade dos habitantes de um edifício, e das pessoas responsáveis pela construção e manutenção do mesmo. Devem ser analisadas as fichas técnicas dos diversos materiais, componentes de construção (isolamentos, revestimentos, pinturas, vernizes, madeiras) de forma a reduzir-se a integração no edifício de substâncias tóxicas como os formaldeídos, COV, e outros produtos químicos prejudiciais que se encontram correntemente nos materiais de construção e que podem afectar a qualidade de vida dos ocupantes.

De modo a diminuir os riscos para a saúde dos ocupantes, dever-se-á ter conta na fase de projecto, entre outros, os seguintes aspectos:

(i) Selecção de tintas de água com base de látex e sem chumbo, em vez de tintas de óleo com diluentes tóxicos como o benzeno, xileno e tolueno;

(ii) Preferir sempre que possível madeiras no seu estado natural aos aglomerados de madeira, onde é utilizado o formaldeído como aglomerante e conservante. Este problema também é comum no mobiliário, pelo que é conveniente a realização de ensaios que comprovem a possível presença deste químico;

(iii) Seleccionar materiais e sistemas que não apresentem clorofluocarbonetos (CFC) e hidroclorofluocarbonetos (HCFC), pois cerca de 50% dos clorofluocarbonetos produzidos são utilizados na construção. Estes componentes apresentam diversos riscos quer a escala local (riscos para a saúde dos ocupantes), como à escala global através da destruição da camada de ozono;

(iv) Assegurar que no edifício não é utilizado amianto ou qualquer outro material que o contenha;

(v) Evitar o uso de adesivos, selantes, pinturas, vernizes e revestimentos que possuam elevadas quantidades de compostos orgânicos voláteis (COV).

Quadro 3.7 – Exemplos de substâncias tóxicas e seus efeitos na saúde dos ocupantes dos edifícios

Substâncias	**Propriedades**	**Materiais, produtos ou componentes utilizados na construção onde podem ser encontradas**	**Efeito(s) na saúde dos ocupantes**
Amianto	Variedade de vários silicatos naturais, de cálcio e de magnésio com textura fibrosa, resistente ao fogo, que era muito utilizado para fabricar materiais e tecidos incombustíveis.	• Antes de ser proibida a sua integração nos materiais de construção era comum, existindo ainda muitos edifícios com componentes e materiais com esta substância. Era utilizado correntemente como: • Armadura em argamassa de cimento (fibrocimento) para a realização de depósitos, chapas de cobertura, tubagem, elementos de revestimento e artefactos; • Isolante (acústico e térmico).	• Asbestose; • Cancro do pulmão; • Outros cancros no aparelho digestivo; • Estas doenças apresentam-se latentes durante um longo período de tempo, o que significa que os sintomas poderão surgir somente passado um período de 20 a 40 anos após a exposição.
CFC/HCFC	À temperatura ambiente são fluídos incombustíveis e incolores.	• Espumas; • Isolamentos; • Sistemas de ar condicionado; • Extintores que contenham hálon.	• Irritação cutânea; • Vómitos; • Sonolência; • Dermatite; • Depressão do sistema nervoso central;
Chumbo	Material metálico que se encontra disperso no ambiente natural.	• Tintas (principalmente em pinturas antigas, pois actualmente é proibido o fabrico de tintas com esta substância); • Acessórios de redes hidráulicas de edifícios antigos. Em muitos edifícios antigos, construídos antes da proibição da utilização do chumbo nas redes de abastecimento de água é ainda possível encontrar acessórios em chumbo.	• Ingerido continuamente em baixas quantidades: nas crianças até seis anos de idade pode provocar atrasos de desenvolvimento, problemas de aprendizagem, baixo QI, hiperactividade e problemas de disciplina; • Doses maiores podem provocar: hipertensão, anemia, esterilidade. • A quantidade de chumbo no organismo é cumulativa e irreversível.

Quadro 3.7 (cont.) – Exemplos de substâncias tóxicas e seus efeitos na saúde dos ocupantes dos edifícios

Substâncias	Propriedades	Materiais, produtos ou componentes utilizados na construção onde podem ser encontradas	Efeito(s) na saúde dos ocupantes
Formaldeído	COV muito comum. Químico que é libertado para o ar sob a forma de um gás acrimonioso/ caustico. É utilizado como conservante e adesivo, pelo que é muito utilizado na construção e indústria do mobiliário.	• Madeiras como conservante (carpintarias de limpo e mobiliário); • Aglomerados de madeira, como ligante; • Produtos têxteis, como agente anti-encolhimento.	• Se inalado: dores de garganta, diminuição da frequência respiratória, irritação do aparelho respiratório, edema pulmonar e pneumonia, problemas de fígado, rins e no sistema nervoso central. Fatal em altas concentrações. • Em contacto com a pele: irritação da pele, com vermelhidão e dor.
Radão	Gás inodoro e radioactivo que resulta do empobrecimento do urânio. O urânio está presente na maior parte do solo e das rochas existentes no mundo.	• Pedra (revestimento e estrutural), encontrando-se principalmente no granito, xisto e uranite; • Pode estar presente em grandes quantidades no subsolo do terreno, principalmente nas zonas graníticas.	• Aumenta as possibilidades de desenvolvimento do cancro do pulmão.
Tolueno	Sólido ou líquido (a partir dos 21.5ºC) com odor forte e acrimonioso.	• Solvente em pinturas de óleo; • Colas; • Alcatifas; • Espumas de poliuretano.	• Irritação nos olhos, pele, nariz e garganta; • Náuseas; • Dores abdominais; • Edema pulmunar; • Dificuldades respiratórias; • Lacrimação • Cancro no pâncreas e fígado.
Xileno	Líquido incolor com odor aromático.	• Solvente em pinturas de óleo; • Colas; • Alcatifas; • Espumas de poliuretano.	• Irritação nos olhos, pele, nariz e garganta; • Vertigens; • Náuseas; • Descoordenação; • Dermatite; • Anorexia.

3.2.2.6. Custos económicos associados ao ciclo de vida dos materiais

A maior parte dos projectistas, selecciona os materiais e componentes de construção tendo apenas em consideração o seu **custo de aquisição**, esquecendo-se que durante o período de vida dos edifícios, os materiais e componentes sofrem degradações pelo seu uso, pelo que é necessário a sua manutenção e até mesmo substituição mais do que uma vez.

Aceitando que a vida útil de um edifício de construção recente se desenvolve num período de 50 até 100 anos, facilmente constatamos que o período mais alargado e consequentemente onde ocorrem maiores investimentos, corresponde às fases de **exploração (operação), manutenção** e **reabilitação**. Assim, a análise de custos do material deve incidir sobretudo nestas fases. Quanto maior a durabilidade de um material, menores serão os custos nestas fases.

Outras componentes de custo importantes, mas correntemente ignoradas são: o custo de **desmantelamento/demolição** e o custo de **eliminação**. O custo de desmantelamento/demolição é tanto menor quanto menor for a peso e o volume da estrutura a desmantelar e o grau de ligação entre os diversos materiais e componentes de construção. O custo de eliminação corresponde ao somatório dos custos associados ao transporte dos materiais provenientes do desmantelamente/demolição até aos locais de depósito com os custos associados ao tratamento e/ou acondicionamento dos produtos de modo a que o seu impacte no meio ambiente e na saúde dos habitantes seja o menor possível.

A análise económica do ciclo de vida do material ou componente só se encontra completa se for considerado o seu **valor venal** (fig 3.35). O valor venal corresponde ao valor económico do material no final do seu ciclo de vida, e é tanto maior quanto maior for a seu potencial de reutilização e de reciclagem.

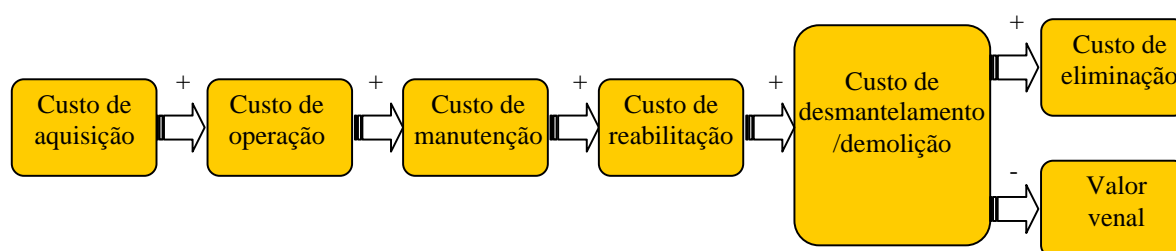



Figura 3.35 – Custos económicos associados ao ciclo de vida dos materiais e componentes de construção

Quando a análise de custos de um material incide sobre a totalidade do seu ciclo de vida, a aquisição de materiais com custo inicial mais elevado pode ser justificada se assim se diminuírem os custos futuros. Um custo inicial mais elevado é também justificado se o produto apresentar melhor comportamento ambiental do que outros durante o seu ciclo de vida.

3.2.3. Água

3.2.3.1. Enquadramento

A quantidade de água disponível para ser utilizada no planeta é finita, pelo que à medida que a população cresce, a água disponível *per capita* diminui. Com o crescimento da população em1.8 biliões verificado a partir de 1970, a disponibilidade de água *per capita*, diminuiu um terço. O consumo de água global a partir de 1980 mais do que triplicou, sendo estimado actualmente em 4.340 km^3 por ano. A procura de água em todos os sectores – doméstico (urbano), industrial e agrícola – cresceu exponencialmente, muitas vezes devido à falta de gestão, uso excessivo e desperdício. Em muitos locais do globo, há medida que a água escasseia, as populações assistem ao aumento do seu custo, a faltas de água sazonais e à diminuição da sua qualidade (Athens *et al*, 1996).

> "A falta de água provoca enormes dificuldades a mais de mil milhões de membros da família humana". (Kofi Annan, Secretário-Geral das Nações Unidas).

Se o actual consumo se mantiver, em 2025 dois em cada três habitantes do planeta irão sentir a falta de água. Apesar de todos termos consciência deste problema, pouco ou nada tem sido feito pelos governos ocidentais nestes domínio, e as estatísticas falam por si: uma descarga de autoclismo num país ocidental requer o mesmo volume de água que um habitante num país subdesenvolvido consume o dia inteiro para a sua higiene e restantes tarefas! Mas, o cenário é ainda pior se tivermos em conta que a rede de distribuição de água não é eficiente. A título de exemplo em Portugal, as perdas e fugas de água na rede são responsáveis pelo desperdício médio de cerca de 35% do total do volume de água potável consumido, podendo este valor atingir os 40% em algumas regiões (*in* Deco-Proteste nº230, 2003).

A par deste problema, os municípios deparam-se com a crescente produção de águas residuais, em volume ligeiramente inferior à água consumida. Este cenário tem obrigado os municípios a construir estações de tratamento de águas residuais (ETAR's), cujos custos de operação são elevados e imputados às facturas dos consumidores.

Assim, ao consumo de água estão relacionados, para além de custos ambientais, custos económicos. Apesar da maior responsabilidade no consumo de água que ocorre num edifício ser atribuída aos hábitos dos seus ocupantes, a equipa de projecto também poderá tomar uma série de opções que visam a sua redução. A equipa de projecto deve optar, tal como na gestão de resíduos, pelo **princípio dos três R**, ou seja, nesta caso, deve tomar uma série de medidas que potenciem a **redução dos consumos**, **redução das fugas** e a **reutilização da água**. A gestão do consumo de água nos edifícios pode ser realizada a três níveis:

(i) Selecção de **materiais ou componentes com baixa quantidade de água incorporada**;

(ii) Selecção de **aparelhos sanitários e de dispositivos de utilização mais eficientes**;

(iii) Prever soluções para a **recolha de água das chuvas e reutilização de água**.

3.2.3.2. Água incorporada nos materiais ou componentes de construção

A indústria da construção é um dos sectores que mais volume de água consome. O consumo de água acompanha praticamente todo o ciclo de vida de um material de construção, que vai desde a extracção da sua matéria-prima até à sua demolição, no final do ciclo de vida do edifício. A título de exemplo, para a produção de apenas 1kg de alumínio 50% reciclado são necessários em média 29.000 litros de água (Berge, 2000)! O quadro 3.8 apresenta o consumo de água associada à extracção da(s) matéria(s) prima(s), processamento e produção de alguns materiais de construção.

Quadro 3.8 – Água utilizada na produção de alguns materiais de construção (fonte: Berge, 2000)

Material	Consumo de água (litros/kg)
Aço não reciclado	3 400
Alumínio (50% reciclado)	29 000
Argamassa de cimento	170
Argila (telhas cerâmicas)	640
Argila (tijolo cerâmico)	520
Betão	170
Blocos de betão	190
Cobre não reciclado	15 900
Gesso	240
Lã de rocha	1 360
Madeira laminada	390
Vidro	680

3.2.3.3. Aparelhos sanitários e dispositivos de utilização mais eficientes

É na perspectiva técnica que se encontram as intervenções mais importantes no domínio da racionalização do consumo de água, através de novas concepções dos aparelhos sanitários e dos dispositivos de utilização. Na figura 3.36 encontram-se representados alguns exemplos da utilização da água nos edifícios.

As **bacias de retrete**, **chuveiros** e **torneiras** são as áreas chave onde se pode actuar de modo a reduzir o consumo de água (fig. 3.37). Tendo em conta certas opções simples e pouco onerosas é possível diminuir a pressão nos recursos hídricos disponíveis e reduzir a factura da água no final do mês.

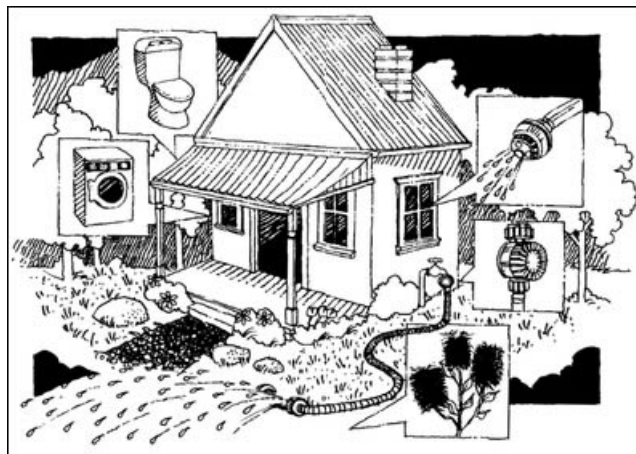



Figura 3.36 – Utilização da água nos edifícios (fonte: AGO, 2003)

Figura 3.37 – Principais destinos da água nos edifícios (fonte: AGO, 2003)

As **bacias de retrete** são responsáveis pelos maiores desperdícios de água que têm lugar numa habitação. Se se tiver em conta que a água desperdiçada é de qualidade alimentar, facilmente se compreende que tudo deve ser feito para que se diminuam os consumos por esta via. Existem várias soluções técnicas para a redução do consumo de água nas bacias de retrete, destacando-se:

(i) A selecção de modelos de autoclismo de baixa capacidade. A implementação de autoclismos de 6 litros em detrimento dos autoclismos de 9 litros de capacidade permite a poupança de 3 litros de água em cada descarga. Se se admitir um número médio de cinco descargas por dia, a opção por um autoclismo de menor volume, traduz-se na poupança de 5.475 litros por autoclismo/ano;

(ii) A opção por autoclismos de descarga diferenciada (dois botões) ou com comando de interrupção da descarga (fig. 3.40). Numa família tipo, constituída por três pessoas, a opção por um autoclismo de descarga dupla de 3/6 litros em detrimento de um autoclismo clássico, traduz-se na poupança anual de 28 mil litros de água (*in* Deco-Proteste nº203, 2003);

(iii) A implementação de redutores de descarga. A introdução de objectos (p.e. garrafas cheias de areia) no interior do depósito dos autoclismos é uma solução possível para reduzir o volume de cada descarga;

(iv) A opção por bacias de retrete em sistema seco. Este tipo de bacias de retrete não necessitam de água para o tratamento e transporte dos excreta humano. O tipo mais comum de bacia de retrete em sistema seco é o de compostagem (fig. 3.38 e 3.39).

Figura 3.38 – Aspecto de uma bacia de retrete de compostagem (Envirolet™)

Figura 3.39 – Representação esquemática das partes constituintes de uma bacia de retrete de compostagem (Envirolet™)

Figura 3.40 – Autoclismo de descarga diferenciada (*in* Deco-Proteste nº203, 2003)

Figura 3.41 – Chuveiro de baixo caudal (*in* Deco-Proteste nº203, 2003)

É nos **chuveiros** que existem as soluções mais económicas e eficientes para a poupança de água. Um chuveiro tradicional possui um caudal médio de 13 litros de água por minuto. Existem no mercado chuveiros mais eficientes, com caudais na ordem dos 7 litros por minuto (fig. 3.41). A

opção por este tipo de chuveiros traduz-se num investimento praticamente desprezável mas com melhorias significativas ao nível do consumo água. Dependendo do modelo que se escolhe, é ainda possível usufruir-se de características adicionais como: massagem, auto-limpeza e corte de fluxo.

Ao nível das **torneiras** é possível diminuir o consumo se se optar pelas seguintes soluções:

(i) Selecção de modelos de menor caudal (4 litros por minuto) em detrimento dos modelos clássicos que consomem em média seis litros;

(ii) Aplicação de emulsionadores de caudal (filtros arejadores) nas torneiras onde não seja necessário grande volume de água, como nas cozinhas e nos lavatórios (fig. 3.42);

(iii) Opção por torneiras de menor ângulo de abertura, como por exemplo, as torneiras monocomando que permitem o corte do fluxo mais rapidamente e, por conseguinte, com menores desperdícios (fig 3.43);

(iv) Aplicação de torneiras automáticas ou semi-automáticas (com infravermelhos ou temporizador) em locais onde se preveja que exista grande probabilidade das torneiras ficar abertas, como por exemplo nas casas de banho públicas.

Figura 3.42 – Torneira com filtro arejador (*in* Deco-Proteste nº203, 2003)

Figura 3.43 – Torneira monocomando (*in* Deco-Proteste nº203, 2003)

A selecção de outros dispositivos de utilização, como as **máquinas de lavar a louça** e **máquinas de lavar roupa,** é geralmente da responsabilidade dos utilizadores do edifício, não havendo aqui a intervenção da Equipa de Projecto. No entanto, é de assinalar que os consumos verificados são bastantes díspares, cabendo ao comprador a responsabilidade da selecção de modelos de baixo consumo de água. É actualmente possível adquirirem-se modelos deste tipo de equipamentos que utilizam menos água do que as lavagens manuais. As máquinas de lavar louça e roupa eficientes consomem actualmente 15 e 60 litros de água, respectivamente (*in* Deco-Proteste nº203, 2003).

Para além das soluções apresentadas anteriormente, para que o consumo de água por esta via seja menor, os fabricantes e comerciantes deverão informar os utilizadores quanto ao consumo de água dos equipamentos que comercializam. Para que os utilizadores possam optar por modelos

mais eficientes deveria ser obrigatório, assim como acontece com o consumo de energia (com a etiqueta de consumo energético) a implantação em Portugal da **etiqueta do consumo de água**, tal como acontece, por exemplo, na Austrália (fig. 3.44).

Figura 3.44 – Etiqueta do consumo de água implementada na Austrália
(fonte: AGO, 2003)

3.2.3.4. Recolha de água da chuva e reutilização de água

A rega dos espaços exteriores é também responsável por uma parte significativa dos consumos da rede interior. A recolha das águas da chuva e seu armazenamento numa cisterna era uma solução muito comum, algumas dezenas de anos atrás, nas regiões mais secas do país, sendo a água recolhida de qualidade alimentar.

Hoje, com a proliferação dos poluentes atmosféricos, a água da chuva deixou de ter, em algumas regiões do país (meios urbanos), a qualidade necessária à sua utilização alimentar. No entanto, esta poderá ainda ser utilizada para a rega dos espaços exteriores. O armazenamento da água da chuva que se precipita, por exemplo, numa cobertura durante as estações mais húmidas, é uma solução complementar para a redução dos consumos nas regas durante os períodos secos (fig. 3.45).

Figura 3.45 – Recolha e armazenamento de água das chuvas
(fonte: AGO, 2003)

Com um tratamento adequado e se os regulamentos locais o permitirem, é possível utilizar as águas residuais na rega dos espaços exteriores e nas bacias de retrete. Existem actualmente

exemplos de edifícios que apresentam duas redes de abastecimento segregadas, que permitem a condução de água de menor qualidade até às bacias de retrete. A título de exemplo, no Algarve, existem alguns empreendimentos turísticos que utilizam as águas residuais do próprio empreendimento para a rega dos espaços exteriores (jardins e campos de golfe), depois de sofrerem um tratamento apropriado.

3.2.4. Produção de resíduos

3.2.4.1. Enquadramento

Os **resíduos** resultantes da indústria da construção constituem uma parte significativa do total de resíduos produzidos sendo, por isso, importante o seu estudo. Actualmente, no contexto Europeu, a construção é responsável, em média, pela produção de 30% do total de resíduos produzidos. Em Portugal, não existem estatísticas credíveis a este nível, mas tendo em consideração a forte presença da indústria da construção nos últimos anos e a seu baixo grau de industrialização, este valor deverá ser muito maior.

Estes resíduos provêm das mais diversas fontes: produção de materiais, perdas durante o seu armazenamento, transporte, construção, manutenção e demolição (fig. 3.46).

Figura 3.46 – Aspecto de parte dos resíduos provenientes da demolição de um edifício em Matosinhos

A melhor maneira de lidar com os resíduos da construção é em primeiro lugar evitá-los. Depois deve-se tentar reciclar a maior quantidade possível. A incineração e a deposição dos resíduos em lixeiras e aterros sanitários devem ser evitadas.

Segundo um trabalho apresentado pela EDA (European Demolition Association) em 1992, a indústria da construção na Europa Ocidental gerava na altura entre 0,7 a 1 toneladas de resíduos por habitante e por ano. O mesmo estudo previa para o ano 2000 a produção de 215 milhões de toneladas de resíduos na construção e demolição, das quais 175 Mton (81%) seriam provenientes da demolição e 40 Mton (19%) da construção. De acordo com um estudo mais recente, realizado para a Comissão Europeia em 1999, os dados relativos à produção de resíduos devido à construção e demolição em milhões de toneladas são os que constam no quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Estimativa do total de resíduos provenientes da construção e demolição na EU
(fonte: Comissão Europeia, 1999)

País	Ano da estatística (ou estimativa)	Inertes (Betão, tijolo, telhas, azulejo, etc)	Outros detritos	Total (ton)	População em milhões (1997)	Total em kg/pessoa/ ano	Percentagem do país em relação aos 15 da EU
Alemanha	1994-96	45,0	14,0	**59,0**	82,0	720	32,8
Reino Unido	1996	n.d.	n.d.	**30,0**	58,9	509	16,7
França	1990-92	15,6	8,0	**23,6**	58,4	404	13,2
Itália	1995-97	n.d.	n.d.	**20,0**	57,5	348	11,1
Espanha	1997	n.d.	n.d.	**12,8**	39,3	325	7,1
Holanda	1996	10,5	0,7	**11,2**	15,6	718	6,2
Bélgica	1990-92	6,4	0,3	**6,8**	10,2	666	3,8
Áustria	1997	3,6	1,1	**4,7**	8,1	580	2,6
Portugal	1997	n.d.	n.d.	**3,2**	9,9	325	1,8
Dinamarca	1996	1,8	0,8	**2,7**	5,3	509	1,5
Grécia	1997	1,8	n.d.	**1,8**	10,5	172	1,0
Suécia	1996	1,1	0,6	**1,7**	8,8	193	1,0
Finlândia	1997	0,5	0,8	**1,3**	5,1	255	0,7
Irlanda	1995-97	0,4	0,2	**0,6**	3,7	162	0,3
Luxemburgo	1997	n.d.	n.d.	**0,3**	0.4	700	0.2
EU – 15	-	-	-	**179,7**	373,7	481	100,0

3.2.4.2. Medidas que potenciam a redução e a reutilização/reciclagem dos resíduos

A quantidade resíduos da Construção e a sua eventual reutilização ou reciclagem, depende fundamentalmente do tipo de materiais e técnicas de construção utilizados, para além, da organização da empresa de construção, das especificações do projecto e da qualificação da mão-de-obra (Teixeira *et al*, 2001).

É durante a fase de concepção, que os intervenientes no projecto, devem assegurar a utilização de materiais e de técnicas construtivas que garantam a reciclagem ou a futura reutilização dos resíduos resultantes da demolição/desmantelamento, devendo ser assegurados os seguintes princípios (Teixeira *et al*, 2001):

(i) **Evitar a utilização de materiais compósitos que não podem ser separados**;

(ii) **Evitar a ligação entre os diversos elementos de construção de uma forma inseparável**. Para se facilitar a reutilização e a reciclagem, deverá dedicar-se especial atenção ao método de união entre o material/elemento de construção e a estrutura do edifício. Os métodos de união mecânicos são preferíveis em relação aos químicos, pois facilitam a reutilização do material no final do seu ciclo de vida;

(iii) **Projectar os edifícios prevendo o seu futuro desmantelamento** e não apenas a sua demolição.

Uma das grandes fontes de resíduos na construção ocorre durante a fase de construção dos edifícios. Desta fase resultam em média, cerca de 10% do volume total de resíduos produzidos pela indústria da construção (Berge, 2000).

Em geral, a redução de resíduos produzidos no estaleiro de obra pode ser melhorada se forem observados os seguintes aspectos:

(i) **Criar espaços no estaleiro para a separação e armazenamento dos resíduos**. A criação destes espaços facilita a valorização dos resíduos, potenciando a sua utilização na própria obra. No final da obra os resíduos remanescentes serão mais facilmente reutilizados/reciclados se estiverem separados por tipo;

(ii) **Devolver ao fornecedor as embalagens que acompanham os materiais**. As embalagens que acompanham os materiais, produtos e componentes de construção são responsáveis por uma grande parte dos resíduos produzidos na fase da construção. A maior parte das embalagens serve para acondicionar correctamente os produtos, para que estes não sofreram danos durante a fase de transporte. Existem no entanto, algumas embalagens que mais não servem do que para ostentar o logótipo da empresa que produz/comercializa o produto. Se os fornecedores fossem obrigados a recolher as embalagens, decerto que os produtores tudo fariam para que estas fossem reutilizadas, de modo a diminuírem os custos relacionados com esta operação;

(iii) **Armazenar convenientemente os materiais em estaleiro**, evitando a sua degradação devido à sua exposição aos agentes atmosféricos ou a choques acidentais;

(iv) **Optar pelos contratos de fornecimento do tipo "just-in-time delivery"**. Nos contratos deste tipo os fornecedores comprometem-se a fornecer os materiais somente na data em que estes são necessários. Este tipo de contrato, em detrimento da aquisição da quantidade total de material na fase inicial da construção, previne a degradação focada no ponto anterior e permite um melhor controlo da quantidade de material necessária.

(v) **Acondicionar correctamente os materiais durante as fases de transporte**, evitando danos;

(vi) **Inspeccionar o estado dos materiais no acto da sua recepção** e sua posterior devolução ao fornecedor se estes estiverem eventualmente danificados.

PARTE II

TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS

CAPÍTULO 4

ENQUADRAMENTO

4.1. Introdução

Nesta parte vão-se reunir alguns exemplos de novos sistemas construtivos mais sustentáveis que, com a evolução científica que se tem verificado nos últimos anos nesta área, se encontram a ser desenvolvidos e/ou implementados no sector dos edifícios.

A combinação de materiais, utilizados na materialização dos diversos elementos de construção de um edifício, denomina-se por **solução construtiva**. A combinação das soluções construtivas utilizadas na definição dos principais elementos de construção: pavimentos, paredes e coberturas; é conhecida por **sistema construtivo**. Devido à investigação e à evolução tecnológica que se desenvolve no domínio da Construção, existem actualmente inúmeros exemplos de novos sistemas construtivos, surgindo todos os dias novas soluções, a maioria com baixa capacidade de vir a ser amplamente aplicada na construção.

Para além do aparecimento de novos sistemas construtivos, também nas últimas décadas se tem assistido ao ressurgimento de algumas soluções correntes no passado e que foram praticamente abandonadas, como o Adobe e a Taipa. Com o crescimento da consciência ecológica e com a aplicação da ciência à construção, o Homem passou a compreender melhor e aprendeu a corrigir o comportamento de alguns sistemas construtivos do passado, que se mostram actualmente bastante mais compatíveis com o equilíbrio dos ecossistemas, do que os actuais sistemas construtivos amplamente implementados e disseminados. Na evolução dos sistemas construtivos em terra, destaca-se a tecnologia BTC, que é uma solução relativamente recente. Por outro lado, o rápido surgimento de novos sistemas construtivos na segunda metade do século XX, que foram aplicados na construção sem serem devidamente estudados, bem como, a descredibilização dos sistemas baseados no material que, no início do século XX, se julgava ser a solução para todos os

inconvenientes dos materiais conhecidos até então (o betão armado), tem facilitado este ressurgimento. Os sistemas construtivos em terra – Adobe, Taipa e BTC – serão abordados nesta parte.

Ao nível de novos sistemas construtivos serão focados dois exemplos que são amplamente utilizados noutros países, mas que em Portugal ainda são pouco conhecidos: os sistemas construtivos em estruturas de perfis metálicos leves (Light Gauge Steel Frammig – LGSF) e os sistemas construtivos em betão celular autoclavado (Autoclaved Cellular Concrete - ACC).

Tendo em conta a influência da envolvente vertical dos edifícios no seu comportamento, no final desta parte, serão abordadas duas soluções construtivas não convencionais para a envolvente vertical dos edifícios: a Parede de Trombe e a fachada ventilada. A Parede de Trombe é uma das soluções para a envolvente vertical dos edifícios mais utilizada na arquitectura bioclimática, permitindo um melhor aproveitamento dos recursos endógenos, o que potencia a diminuição do consumo de energia convencional, com vantagens económicas e ambientais. A fachada ventilada é uma tecnologia de fachadas relativamente recente que surgiu das investigações realizadas neste domínio, que têm resultado em soluções cada vez menos espessas e, por conseguinte, mais leves, compostas por uma série de camadas com funções cada vez mais específicas.

4.2. Critérios para a selecção de sistemas construtivos

Atendendo ao elevado número de soluções e sistemas construtivos disponíveis, para a selecção do mais adequado, será necessário averiguar as vantagens e reservas de cada um deles, atendendo ao tipo de clima, distância até à fonte do recurso, disponibilidade económica, estilo arquitectónico e estética pretendidos. Resumidamente, os factores mais importantes que influenciam a selecção da tecnologia construtiva mais adequada são (adaptado de AGO, 2003):

- **Durabilidade** das soluções comparativamente à vida útil projectada para o edifício;
- **Análise global dos custos da solução** (custo inicial, custo de operação, custo de manutenção, custo de reabilitação, custo de demolição/desmantelamento, valor venal, custo de eliminação);
- **Comportamento térmico**. O modo como uma solução construtiva condiciona o comportamento térmico do edifício é importante na previsão da quantidade de energia necessária nas operações de aquecimento e arrefecimento (custos económicos e ambientais);
- **Impacte ambiental** de todos os materiais e componentes de construção utilizados, bem como, dos processos de construção associados;
- **Disponibilidade de técnicos e de empresas de construção** que possuam a adequada formação para lidarem com a solução construtiva pretendida;
- **Disponibibilidade de materiais** no mercado;

- A **manutenção** esperada;
- A **flexibilidade** da solução e o seu potencial de reutilização/reciclagem;
- A **distância de transporte** prevista para cada material e componente.

A opção pelo sistema construtivo mais adequado ao tipo de clima e à localização de um edifício, conduz, tal como já foi referido na Parte 1 – capítulo II, a melhores níveis de conforto térmico, menores custos de construção e de manutenção, maior durabilidade e reduz o impacte ambiental global produzido durante o ciclo de vida do edifício.

4.3. Entraves à entrada de novos sistemas construtivos em Portugal

Em Portugal, apesar de existirem realidades climáticas diferentes, as soluções construtivas utilizadas nos edifícios de todo o território são praticamente iguais. A construção actual é baseada numa fórmula que se encontra bastante enraizada e que é utilizada em todo país, independentemente das diferenças existentes ao nível do clima, localização geográfica, disponibilidade da matéria-prima e estilo de vida dos seus ocupantes. Esta fórmula baseia-se num sistema construtivo em que as paredes exteriores são alvenaria dupla de tijolo, as interiores são em alvenaria de tijolo simples e as lajes constituídas por vigotas pré-esforçadas com blocos de cofragem perdida (fig. 4.1).

Figura 4.1 – Fase de construção de edifício em sistema construtivo convencional (Matosinhos)

A utilização sistemática desta fórmula, que é baseada em soluções construtivas desenvolvidas há mais de 50 anos e que pouco têm evoluído ao longo dos anos, deve-se a inúmero factores, destacando-se:

- **Factores económicos**. Os sistemas construtivos convencionais nos edifícios nacionais baseiam-se em materiais, cujas fontes de matéria-prima são abundantes, pelo que o custo de construção acaba por ser menor, quando comparado com sistemas

que utilizam materiais não locais. Por outro lado, a elevada concorrência existente ao nível dos sistemas convencionais, que resulta do grande número de produtores de materiais para a construção convencional e da abundância de industriais da construção/empreiteiros que "dominam" as soluções construtivas convencionais, tornam estas soluções mais competitivas ao nível do custo de construção, quando comparadas com outras em que o número de empresas especializadas é muito menor.

- **Baixa qualificação dos operários da construção**. A pouca atracção que os aspectos práticos e de produção na construção exercem sobre os jovens, com uma imagem associada a trabalhadores pouco qualificados, envelhecidos e imigrantes, é um entrave à aplicação de soluções construtivas tecnologicamente mais evoluídas que necessitam de trabalhadores mais qualificados.

- **Falta de formação dos técnicos da construção**. A formação dos técnicos da construção (engenheiros e arquitectos) está sobretudo, senão exclusivamente, orientada para as soluções construtivas convencionais, pelo que não se dominam as características técnico-funcionais de outras soluções. Por outro lado, são ainda escassos os cursos de formação contínua na área da construção que permitem a actualização dos conhecimentos dos diversos intervenientes.

4.4. Tendências na construção

4.4.1. Materiais

Desde o início da segunda metade do século XX tem-se verificado um desenvolvimento tecnológico significativo na área dos materiais de construção, através do desenvolvimento, por exemplo, de aços de maior resistência, betões de melhores *performances*, utilização generalizada de vidros, polímeros e alumínio, assim como de materiais compósitos, "ópticos", "electrónicos" e bio-materiais.

Apesar da imensa profusão de novos materiais (como as fibras de carbono, as pedras artificiais, vidro especiais, etc.) ainda predominam os materiais tradicionais, destacando-se por ordem decrescente de utilização, o tijolo, o betão pronto, o cimento, os agregados, o aço e o ferro, cerâmicos de revestimento, o gesso, os alumínios, as carpintarias, vidros, as tintas e vernizes, e todo o infindável rol de materiais utilizados nas diversas soluções construtivas existentes.

Contudo é ainda no domínio dos materiais designados por primários, devido à sua utilização ancestral – caso da pedra, madeira e do ferro –, que através da aplicação da ciência à construção, se desenvolveram soluções mais elaboradas e de maior valor. A inovação neste campo consistiu no desenvolvimento de complementaridades para um novo material-produto, como é o caso do betão (agregados pétreos + cimento + adjuvantes que melhoram as suas propriedades), dos lamelados colados (madeira + resinas) ou ainda do aço (ferro + carbono) (Simões, 2002).

O betão é ainda, e apesar de todos os inconvenientes apontados até agora, o material base nas principais soluções construtivas da Construção portuguesa. Esta hegemonia deve-se

principalmente às suas elevadas potencialidades, associado a um custo bastante competitivo quando comparado com outras soluções. Contudo, a "verdadeira inovação" na Construção passará pela descoberta e desenvolvimento de um material que substitua o betão e que seja uma mais valia sob o ponto de vista económico e ambiental.

A evolução no domínio dos materiais e processos de Construção, tem vindo a levar ao desenvolvimento dos materiais compósitos, destacando-se pela sua importância os materiais de matriz polimérica. Estes materiais, relativamente aos tradicionais, apresentam uma série de vantagens, destacando-se a maior resistência, e consequente diminuição do peso e volume dos componentes da construção, facilidade de aplicação, durabilidade e simplicidade de manutenção, entre outras, permitindo assim obter ganhos de produtividade e de competitividade de forma a proporcionar uma maior valia à organização da construção (Simões, 2002). Contudo, em termos ambientais a utilização de materiais compósitos é uma solução pouco desejável pois, é difícil a separação dos seus constituintes no final da sua vida útil, para que seja possível a sua reciclagem.

No que respeita à certificação de qualidade dos materiais de construção, apesar de ainda ser escassa, tem-se verificando uma evolução significativa, muito devido ao aparecimento da qualidade como uma mais valia e aspecto diferenciador na Construção. A utilização de materiais certificados dá melhores garantias ao cliente/utilizador e iliba os construtores de responsabilidades quando ocorrerem anomalias precoces com origem em deficiências nos materiais.

As crescentes facilidades de comunicação e de circulação conduzem a uma crescente internacionalização dos materiais de construção. A ausência quase total de barreiras técnicas, alfandegárias e legais, bem como a política europeia comum nos critérios de normalização dos materiais tem permitido a sua globalização. No entanto, esta realidade tem apresentado alguns aspectos negativos, nomeadamente no que concerne à durabilidade das construções e ao comportamento térmico das mesmas, pois têm sido utilizados incorrectamente em Portugal materiais, componentes e soluções construtivas utilizadas com êxito noutros países mas que em Portugal, devido às particularidades do clima, não são adequadas. Um exemplo de uma solução construtiva importada dos países nórdicos, onde a radiação solar é muito baixa, e que se encontra muito em voga na arquitectura dos edifícios modernos nacionais, é a utilização de grandes vãos envidraçados sem ser acautelada qualquer solução de sombreamento.

Resumidamente, os novos desígnios dos materiais de construção são (Simões, 2002):

- **Materiais por medida**. A aplicação da química à engenharia dos materiais permitiu a "afinar" as propriedades dos materiais através da manipulação da sua micro-estrutura (cadeia-macromolecular), ou da sua macro-estrutura (fibras, argamassas de resina, materiais compósitos). Deste modo os materiais são obtidos em função da combinação de vários componentes, com vista à satisfação das *performances* pretendidas. A descoberta de materiais de síntese acelerou a concepção e o desenvolvimento dos materiais compósitos, permitindo obter combinações de *performances*, impossíveis de atender a partir de materiais microscópicamente homogéneos.

- **Materiais "inteligentes e programáveis".** Os materiais do futuro serão "inteligentes", no sentido de reagir espontaneamente e sem intervenção humana às condições do meio (tal como acontece num campo de girassóis em relação ao sol). A "inteligência" será integrada no material, de modo a que este possa alterar as suas características face às solicitações, caso dos polímeros a aplicar no revestimento das fachadas e nos envidraçados que definem a sua reflectância em função da temperatura do meio exterior. Os materiais serão também programáveis por computador, podendo ser formulada, organizada e estruturada a matéria para satisfazer um conjunto de exigências predefinidas, como exemplo a forma, a rigidez, etc.

- **Materiais "verdes" e confortáveis.** Por todas as razões apontadas no capítulo II, haverá uma tendência no desenvolvimento e proliferação de materiais que "respeitem" o meio ambiente. É crescente a utilização de materiais que integram matéria reciclada, cujo fabrico é programado de modo a que possuam baixo impacto energético e que tenham grandes possibilidades de virem a ser reutilizados e/ou reciclados. Pretende-se também que a durabilidade destes materiais seja cada vez mais alargada. Quanto ao "conforto", os materiais devem possuir propriedades delicadas, com características agradáveis em termos estéticos e sensoriais, possibilitado a harmonia entre o material e o utilizador. Constitui exemplo, o desenvolvimento de novos materiais em madeira para o revestimento de paredes e pavimentos com estética apelativa e conforto táctil.

- **Materiais biotecnológicos**. A biotecnologia, a par da física, da mecânica e da química, é um ramo da ciência que intervém na concepção de biomateriais, sendo estes compostos por matéria viva com programação genética. São produzidas soluções a partir de células animais e vegetais para desenvolver moléculas biológicas que pelas suas propriedades encontram campo de aplicação no sector da construção. O seu emprego pode ser diverso, desde paredes auto-laváveis que dispensam operações de limpeza a sistemas de regulação higrométrica. Igualmente se prevê a aplicação de biomateriais para a auto-reparação de edifícios (caso de paredes fissuradas), dado que estes materiais são providos de "memória" que lhes permite retornar à sua fase inicial após determinada solicitação.

4.4.2. Produtos

Os produtos da indústria da construção estão sujeitos, tal como nas demais realizações e actividades humanas, às evoluções que se observam na sociedade actual. No entanto, ao contrário de outras indústrias, a construção sofreu nos últimos anos uma evolução muito mais imperceptível. Este cenário deve-se ao facto da indústria da construção se desenvolver na sociedade actual com um conjunto de características muito específicas, que a distinguem de outras indústrias do tipo fabril, quer ao nível dos seus produtos (obras), quer ao nível das características da sua linha de produção. Esta especificidade deve-se fundamentalmente a (Projecto "Engenharia & Tecnologia 2000" - IST):

- **Grande variedade de clientes** e, por conseguinte, grande variedade de produtos. Os clientes da indústria da construção vão desde os organismos públicos associados à

execução de grandes infraestruturas, até à pessoa singular que pretende fazer uma pequena reparação em sua casa.

- **Cada produto realizado (obra) tem origem num projecto específico**, com características diferentes de obra para obra, e que pode ir desde da convencional habitação, até ao edifício inteligente que integra as mais recentes tecnologias, associadas às potencialidades recentes da electrónica, robotização e telecomunicações.

- **Nesta linha de produção, todos os produtos (obras) são diferentes**. Geralmente não existem obras iguais, pelo que a padronização dos produtos, corrente nas demais indústrias, é aqui impossível. Esta realidade dificulta a logística, a mecanização, a normalização e o controlo de qualidade da produção.

- **Os produtos desta indústria são materializados em locais geograficamente distintos**. Ao contrário das outras indústrias, a linha de produção da Construção não é fixa pois, tem de se deslocar até à localização geográfica da obra. Isto obsta à implementação de unidades do tipo fabril para a produção. De facto, actualmente estas unidades só existem na Construção, associadas à produção de produtos parcelares, como: materiais (agregados, cimento, tijolos, etc), elementos pré-fabricados (lajes de vigotas pré-esforçadas, painéis de fachada, divisórias leves, etc) e componentes diversos (aparelhos de climatização, caixilharias, etc).

- **As características de produção dos itens (obras) estão fortemente relacionadas com as condições naturais existentes no local de produção**. O tipo de terreno e a sua morfologia, o espaço físico disponível, a sismicidade, a acessibilidade, os condicionalismos ambientais, entre outros, são factores que influenciam a concepção do produto e da sua linha de produção (estaleiro).

- **O ciclo de Projecto/Produção é muito longo**. O facto do período de tempo que decorre desde da idealização do produto até à sua conclusão ser bastante dilatado, potencia a perda de comunicação entre a equipa de projecto e o empreiteiro, o que pode gerar soluções que não passam de adaptações.

- **Os produtos materializados (obras) têm em geral grandes dimensões para a escala humana**. Isto obrigou ao desenvolvimento de tecnologias específicas para a Construção, nomeadamente equipamentos com elevada capacidade de carga e que permitem trabalhar a grandes alturas. As tolerâncias permitidas nos produtos da Construção são bastante maiores às permitidas noutros produtos de menores dimensões.

- **As entidades intervenientes na produção dos itens (obras) desde a concepção, à construção e ao controle da produção são habitualmente independentes**. Esta realidade gera frequentemente problemas de comunicação (falhas de fluxo de informação) e objectivos, o que não é corrente na produção fabril.

- **O cliente final conhece pouco do produto que está a adquirir**. Isto faz com que dê prioridade frequentemente ao preço em detrimento da qualidade.

Apesar da especificidade da indústria da construção, esta em paralelo com a evolução do Homem, tem que acompanhar o crescimento da consciência ambiental, do desenvolvimento sustentável, integrando ainda preocupações de qualidade, segurança e saúde, quer na escolha da localização das construções, bem como nas realizações e ainda nos materiais e processos.

A indústria da construção é tradicionalmente relevante para a economia dos países ocidentais, pelo que precisa de se posicionar face a estas tendências, tendo em conta a provável redução da sua importância relativa. A sua flexibilidade deve ser alargada de modo a abranger certos nichos de mercado ainda pouco desenvolvidos mas com grande capacidade de crescimento, com destaque para a remodelação, em detrimento da construção nova.

Neste cenário, e no que respeita aos "produtos" desta indústria, verifica-se o aumento do peso das exigências do cliente e utilizador, relativamente às exigências dos demais intervenientes da construção, no condicionamento das soluções a adoptar. O custo da construção deixa de ser o único aspecto que influencia a decisão de compra, e o cliente procurará assim ofertas globais de baixo impacto ambiental, flexíveis e com qualidade arquitectónica e de desempenho (baixos custos de manutenção e conservação, bom isolamento térmico, bom isolamento acústico, entre outros). A figura 4.2 aponta a evolução verificada e expectável e a importância relativa ao longo do tempo de algumas exigências aplicáveis aos produtos da construção.

Ao nível da exigência pelo respeito ambiental da Construção, espera-se que, atendendo às actuais preocupações, esta assuma no futuro uma posição de destaque no seio das exigências supracitadas.

Estas expectativas podem ser encorajadas pelos progressos consideráveis verificados em certos domínios da Construção em Portugal e noutros países (Sousa, 2002):

- A aplicação das ciências como a física, química e matemática, suportada pelos novos desenvolvimentos ao nível da informática e pela investigação experimental, permitiu ao Homem o melhor conhecimento de muitos fenómenos observados nas construções;

- Maior conhecimento dos materiais de construção e da influência dos vários agentes e das suas interacções;

- Disponibilização de ferramentas cada vez mais potentes de apoio à concepção dos produtos e elaboração de projectos, sobretudo graças aos recentes desenvolvimentos informáticos (fig. 4.3);

- Aparecimento de inúmeros novos produtos para a construção, melhoria dos existentes, respondendo melhor às exigências que lhe são aplicáveis, em paralelo com o observado noutras indústrias.

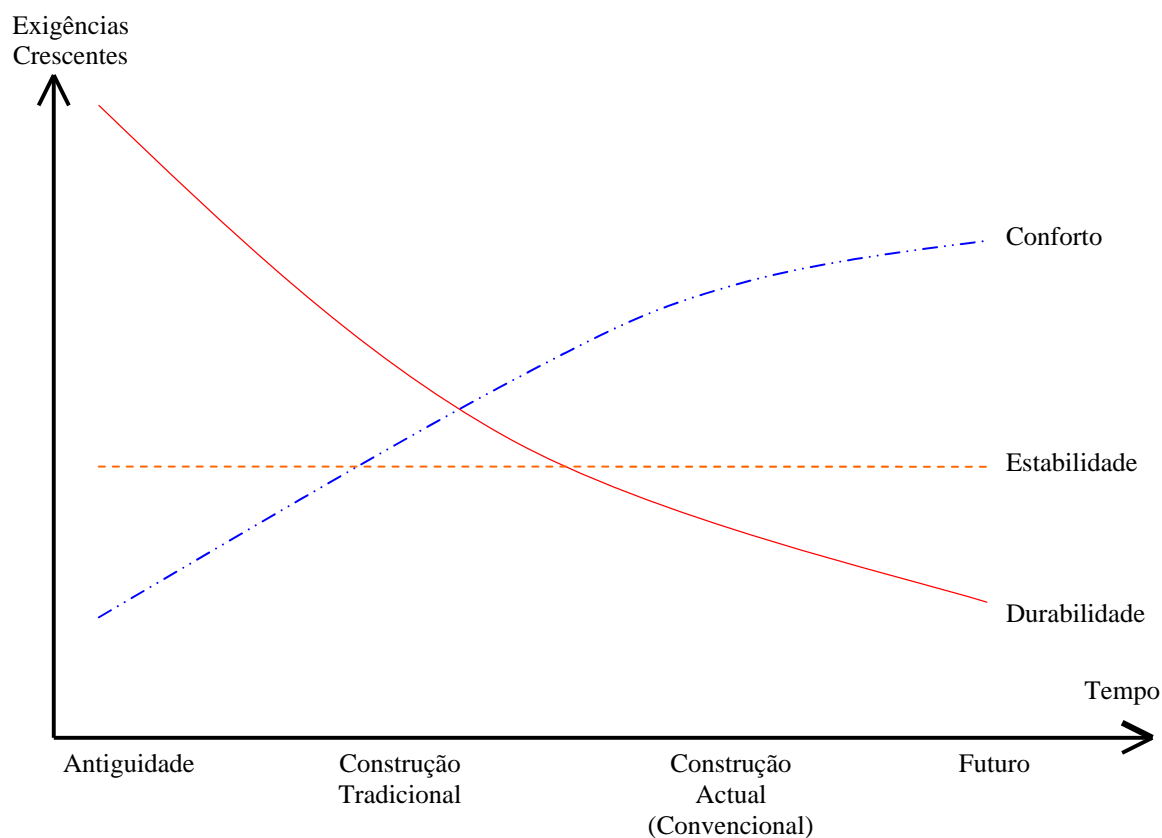



Figura 4.2 – Importância relativa de algumas exigências aplicáveis aos produtos da construção (obras) ao longo do tempo (fonte: Sousa, 2002)

Figura 4.3 – O computador como “ferramenta” da construção

No entanto, estes aspectos são ensombrados por indicadores negativos que merecem alguma preocupação (Sousa, 2002):

- A produtividade e os custos de construção não têm tido as reduções espectáveis face às evoluções acima referidas;

- A qualidade de alguns produtos da Construção é efectivamente variável e com frequência medíocre sob o ponto de vista técnico. Com efeito, em grande parte dos edifícios, a qualidade é insuficiente e os acabamentos são pouco cuidados. Desta realidade resulta uma degradação muito rápida das obras, o envelhecimento precoce, patologias com custos relevantes para todos os intervenientes, provocando perdas de tempo, contenciosos e despesas importantes.

4.4.3. Processos

Os processos construtivos da indústria da construção em Portugal são do tipo artesanal, continuando a basear-se excessivamente nos métodos de construção tradicional, com baixo grau de industrialização, e na mão-de-obra não qualificada, sendo caracterizada pela sua baixa produtividade e utilização excessiva de recursos naturais e energia.

À semelhança do que já aconteceu noutras indústrias, espera-se que ao nível dos processos construtivos e tecnologia, ocorra uma industrialização crescente, neste caso com o aumento de tarefas a realizar em fábrica e diminuição das tarefas em estaleiro. Tendo em conta a actual distribuição de responsabilidades na ocorrência de anomalias nos edifícios, onde a falhas de projecto, nomeadamente a falta de pormenorização, são apontadas como uma das principais causas, é natural que a fase de projecto ocupe, cada vez mais, um lugar de destaque no processo construtivo (fig. 4.4).

Os novos desenvolvimentos ao nível das tecnologias de informação serão progressivamente introduzidosna construção. No processo construtivo, os diversos intervenientes tenderão para especializações crescentes, com responsabilidades mais definidas, acabando assim as figuras do técnico e operário polivalentes, “aptos” para conceber/orientar ou a realizar todas as actividades da construção. Caberá aos gestores coordenadores de projectos profissionais promover a integração das empresas projectistas com as empresas construtoras.

Esta linha de especialização crescente de todos os intervenientes incentivará a subcontratação de empresas especializadas em determinado tipo de obra ou especialidade da Construção (fundações, estrutura, alvenarias, revestimentos, etc).

Os produtores de materiais e componentes não ficarão alienados desta evolução. Com o aumento da concorrência, estes procurarão aumentar o valor acrescentado dos seus produtos, através de uma maior aproximação às empresas de subcontratação e de engenharia. Verifica-se actualmente, um número cada vez maior de associações de empresas produtoras de determinados produtos que prestam aos seus associados serviços de consultadoria técnica, podendo mesmo no futuro ser responsáveis pela coordenação ou preparação técnica de determinadas parcelas da construção.

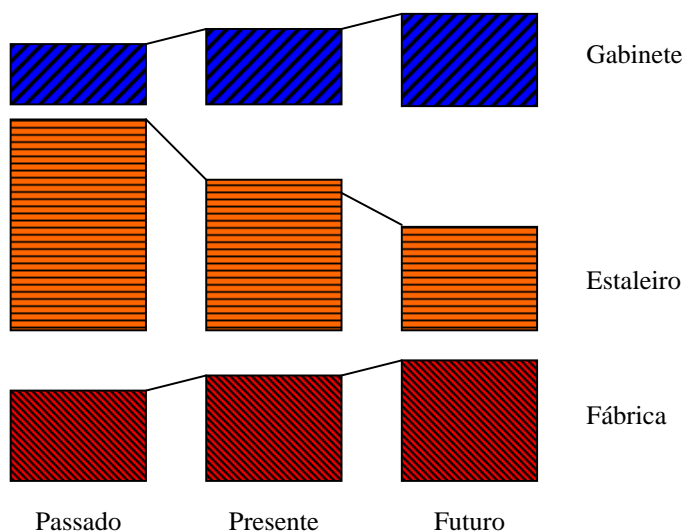



Figura 4.4 – Repartição dos tempos e tarefas na Construção

A modernização do “parque de máquinas” utilizado nos processos construtivos constitui outro factor relevante na optimização do processo produtivo. A modernização dos equipamentos de produção, a sua adaptação e flexibilização é da maior importância tanto no aspecto da majoração da produtividade (caso das plataformas articuladas para elevação, gruas telescópicas “todo-o-terreno” ou “tesoura hidraúlica” para os trabalhos de demolição), como na possibilidade real de execução de trabalhos de grande dimensão e especificidade (utilização de *robots* para a execução de actividades de carácter repetitivo, como acontece, por exemplo, na indústria automóvel).

A crescente industrialização do processo construtivo é um dos pontos-chave para a maximização da sustentabilidade da Construção ao nível dos seus três vectores: social, ambiental e económico. Com a industrialização da Construção pretende-se que a maior parte dos seus elementos sejam produzidos em fábrica, onde os processos produtivos altamente controlados permitem a redução resíduos. Os elementos são produzidos com as dimensões estritamente necessárias à sua futura função, não havendo lugar à produção de resíduos, economizando-se recursos naturais e económicos. Por outro lado, com a realização de um número cada vez maior de tarefas em fábrica e com a crescente mecanização do processo construtivo, consegue-se melhorar as condições de trabalho dos trabalhadores da Construção que têm que suportar as penosas condições de trabalho existentes em estaleiro, pautadas pela alternância das condições atmosféricas, sujidade e descoordenação.

4.5. Tipos de soluções construtivas

Um dos aspectos mais utilizados para tipificar cada uma das soluções construtivas é o seu conteúdo em massa. Assim, as soluções construtivas existentes subdividem-se em dois grupos: **soluções construtivas pesadas** e **soluções construtivas leves**.

As **soluções construtivas pesadas** integram materiais e produtos de elevado peso, como por exemplo, tijolos, betão, blocos de betão, revestimentos cerâmicos, pedra, terra, etc.

As **soluções construtivas leves** utilizam geralmente a madeira ou os perfis metálicos leves como solução estrutural e nos elementos não estruturais e acabamentos são utilizados, por exemplo, painéis de gesso cartonado, painéis de fibrocimento, painéis de aglomerado de madeira e cimento, painéis OSB, etc.

O quadro 4.1, através da comparação dos dois tipos de soluções construtivas, apresenta sucintamente as principais características de cada um deles.

O comportamento térmico e o impacte ambiental produzido pela utilização de materiais pesados e leves dependem fundamentalmente dos seguintes aspectos: do local onde são empregues (no exterior ou no interior dos edifícios); da sua exposição às forças destrutivas da natureza (p.e., fogo, térmitas, chuva, raios UV, humidade, vento, etc.); da distância de transporte; e dos requisitos específicos do edifício (p. e., comportamento térmico, isolamento sonoro, segurança, etc.) (AGO, 2003).

Quadro 4.1 – Comparação entre soluções construtivas leves e soluções construtivas pesadas

Aspecto	Tipo de solução construtiva	
	Pesada	**Leve**
Energia incorporada	Geralmente, grande quantidade	Geralmente, baixa quantidade
Consumo energético para a manutenção das condições de conforto	Quando utilizada em conjugação com o desenho passivo e com um bom isolamento térmico, o comportamento térmico é optimizado, sendo reduzida a quantidade de energia necessária às operações de aquecimento/arrefecimento	A sua utilização em climas com baixa amplitude térmica diurna, pode promover a diminuição do consumo global de energia durante o ciclo de vida do edifício
Clima apropriado	Climas com grandes amplitudes térmicas diurnas	Climas quentes com baixa amplitude térmica diurna
Impacte no terreno de construção	Geralmente elevado, devido ao maior volume de trabalhos de fundação e de movimento de terras	Geralmente pequeno devido ao menor peso dos edifícios

Quadro 4.1 (cont.) – Comparação entre soluções construtivas leves e soluções construtivas pesadas

Aspecto	Tipo de solução construtiva	
	Pesada	**Leve**
Distância aos produtores/fornecedores de materiais	Devido ao seu maior peso, não deve ser utilizada em locais remotos onde a distância de transporte dos materiais e componentes é elevada	Adequada a locais remotos, onde as distâncias de transporte são elevadas
Impacte ambiental dos processos de construção	Elevado, principalmente devido à produção de grande quantidade de resíduos, utilização de equipamentos pesados, etc.	Geralmente, mais baixo

Na maior parte das situações, a adequada combinação de soluções construtivas leves com soluções construtivas pesadas num mesmo edifício, traduz-se na melhor solução em termos económicos e de comportamento ambiental.

CAPÍTULO 5

SISTEMAS CONSTRUTIVOS

5.1. Sistemas construtivos em terra

5.1.1. A evolução histórica da construção em terra

Desde que o Homem constrói cidades, desde há cerca de dez mil anos, que existem construções em terra crua. A construção em terra é uma técnica que se encontra entre as mais antigas, tendo sido a terra um dos primeiros materiais a ser utilizado pelo Homem na construção das suas habitações.

A sua origem remonta à época das civilizações Caldeias e Assírias do crescente fértil Mesopotâmico, tendo sido também uma prática construtiva das civilizações Egípcia, Romana e Muçulmana, principalmente em zonas de fraca pluviosidade. Na Ásia, a terra foi largamente utilizada pelos hindus e monges budistas e, na América, pelas civilizações Maia e Inca. Foi com o Império Romano, que na Europa se deu uma enorme expansão da construção em terra.

Contrariamente ao que se possa inicialmente supor, a terra não foi apenas utilizada na edificação de pequenas construções, como as habitações, mas também na construção de edifícios de grande escala, como os grandes monumentos. São exemplos, grandes troços da Muralha da China, a muralha de Adriano, o palácio de Potala no Tibete (fig. 5.1), as pirâmides de Saqqarah no Egipto ou as ruínas de Chan Chan, o maior complexo pré-colombiano da América do Sul, com uma superfície de 14 km^2. Em Portugal, existem grandes manchas de construção em terra nas zonas mais secas do país, como no Alentejo e no Algarve.

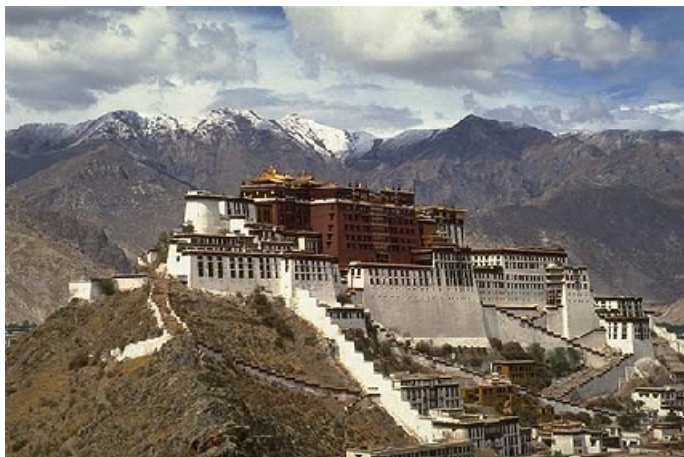



Figura 5.1 – Palácio de Potala (Lhasa, Tibete)

Devido às suas características, este processo encontra-se espalhado um pouco por todo o mundo, sendo utilizado actualmente principalmente nos países do norte de África, na Arábia Saudita e no Iémen do Sul. Na América Central e Latina, a construção em terra contínua a ser utilizada a par de outras técnicas construtivas actuais.

A crise do petróleo, na década de 70, suscitou as primeiras discussões generalizadas em torno da poupança de energia. Nas décadas mais recentes a emissão de gases poluentes na produção de energia através de fontes não renováveis e os seus efeitos perniciosos no meio ambiente têm mantido a discussão na ordem do dia. Assim, se de início eram as razões económicas o principal impulsionador desta tecnologia construtiva no início do século XX nos países em vias de desenvolvimento, actualmente as preocupações ambientais e ecológicas, no sentido de explorar recursos reutilizáveis, bem como uma pesquisa técnica mais atenta acerca das suas potencialidades e fraquezas, potenciaram a construção em terra em países mais industrializados, como a França os Estados Unidos (Lourenço, 2002).

O renascimento e a proliferação das construções em terra nos países mais industrializados teve origem na reposta à necessidade de se encontrar um material de construção que fosse "emprestado" pela natureza e devolvido depois de ser utilizado, com o menor impacte ambiental possível. Por outro lado, como a matéria-prima utilizada nas construções de terra sofre um processamento pouco significativo, caracterizado por um baixo consumo energético e onde a energia utilizada é na sua maior parte a solar, a energia incorporada neste material é bastante baixa, o que torna esta tecnologia numa possível resposta à crescente necessidade de racionalização do consumo energético. Para além de reunir estas valências, este material é ainda económico.

A França foi um dos países Europeus onde a construção em terra se proliferou significativamente durante a ocupação romana. A cidade de Lyon é um dos locais da Europa com maior número de exemplos em construção de terra. Hoje em dia, a França é também um dos maiores impulsionadores no renascimento e adaptação da terra (AGO, 2003).

O processo construtivo existente actualmente é uma evolução de processos existentes há vários séculos. Apesar da terra estar presente na maior parte dos edifícios do mundo e de ser um dos materiais tradicionais mais antigos, a maior parte das suas propriedades e potencial continuam pouco desenvolvidos e investigados.

5.1.2. O material

O material utilizado na construção em terra está ao alcance de todos, sendo inesgotável, fácil de trabalhar e duradouro, quando tomadas as devidas precauções. Uma casa construída em terra apresenta bom comportamento térmico e acústico devido à grande inércia das suas paredes, que se comportam como uma barreira eficaz contra as intempéries. Sendo a terra uma material incombustível, apresenta um óptimo comportamento ao fogo. No entanto, a sua resistência mecânica à compressão é da ordem dos 1 a 3 Mpa e a sua resistência à tracção é desprezável (Lourenço *et al*, 2001).

A escolha da matéria-prima é o factor que mais influencia o sucesso na aplicação da terra na construção, independentemente da técnica a utilizar. Através de procedimentos simples é possível conhecer a granulometria de determinada terra e aferir sobre a sua adequação a este tipo de construção. A selecção da terra prende-se essencialmente com dois factores: o seu comportamento face à água e a sua resistência mecânica (sendo o segundo aspecto influenciado pelo primeiro).

A definição da estrutura da terra depende da forma como as partículas se agregam e de como a água e o ar circulam. A parte mineral da terra é constituída por elementos estáveis (saibro e siltes), os quais conferem a resistência mecânica; e elementos instáveis (partículas com ϕ inferior a 2μ), sendo o principal elemento as argilas, que conferem plasticidade e coesão à terra (Lourenço *et al*, 2001).

De um modo geral, o estudo da granulometria permite definir a composição da terra. Este estudo, para além de servir de base à escolha da técnica construtiva a utilizar, permite saber como corrigir a curva granulométrica e a composição através da adição de elementos – **estabilização**.

Na realidade, a estabilização da terra para a utilização como material de construção é uma prática de longa data, mesmo na arquitectura tradicional.

De um modo geral, os principais objectivos da estabilização são: obter um melhor comportamento mecânico, uma melhor coesão, reduzir a porosidade e as variações de volume, melhorar a resistência à erosão do vento e da chuva, reduzir a abrasão da superfície e impermeabilizar (Lourenço *et al*, 2001).

Os métodos de estabilização mais utilizados consistem na (Lourenço *et al*, 2001):

- Densificação da terra por compressão;
- Inclusão de armaduras de fibras;
- Adição de cimento, cal ou betume.

No método de **estabilização pela utilização de fibras**, a palha continua a ser hoje em dia a fibra mais utilizada. No entanto, são também utilizadas fibras de vidro ou aço.

A utilização de fibras permite diminuir e evitar a fissuração nos processos de secagem das paredes, permitindo distribuir as tensões de retracção da argila por toda a massa. A utilização de palha permite diminuir a massa volúmica e aumentar a resistência mecânica do material. A palha apresenta a desvantagem de se degradar quando exposta por períodos prolongados a ambientes húmidos.

Actualmente, o cimento é o estabilizante mais utilizado. A adição de cimento à terra apresenta duas reacções principais: a aglomeração das partículas estáveis e uma reacção com a argila, tornando-a mais estável.

Na **adição de cal**, a reacção pozolânica é a principal de várias reacções que esta estabelece com a terra. Verifica-se uma dissolução dos minerais argilosos num ambiente alcalino, produzido pela cal e a combinação da sílica e do alumínio das argilas com o cálcio para formar silicatos de alumínio e cálcio, que aglutinam as partículas.

A **utilização de betume** pode ser feita através da mistura com solventes, disperso numa emulsão ou aquecido. O betume aumenta a resistência da terra à água, melhorando a coesão de solos pouco colantes. Para uma distribuição eficaz e homogénea do betume é necessário muita água, pelo que o adobe é a técnica que mais convém a este material de estabilização.

5.1.3. Principais técnicas construtivas utilizadas actualmente

A construção em terra recorre actualmente a uma grande variedade de técnicas, desde as mais rudimentares até aos procedimentos mais sofisticados, industriais, mecanizados e automatizados.

Os parâmetros de produção têm uma influência considerável sobre a qualidade do produto, sobre os rendimentos e sobre a economia da solução. A optimização da produção pode ser decisiva para a aceitabilidade e fiabilidade económica do produto.

Actualmente, fora de um âmbito de aplicação tradicional são empregues essencialmente três técnicas construtivas em terra: a **taipa**, o **adobe** e o “**BTC**”.

5.1.3.1. Taipa

Na taipa utiliza-se a terra húmida para a construção de paredes espessas através de um processo de compactação. As paredes de taipa são construídas através da compactação de uma mistura de agregados seleccionados, incluindo gravilha, areia, siltes, e uma pequena quantidade de argila. A compactação é realizada entre dois painéis de cofragem.

A construção em taipa, também conhecida por “pisé” – termo de origem na expressão francesa “pisé de terre” – foi utilizada pela primeira vez em Lyon, França em 1562. O termo foi aplicado à construção de paredes com pelo menos 50 cm de espessura, materializadas através da compactação de terra entre dois moldes paralelos que são removidos após a secagem da terra (fig. 5.8). Apesar do termo estar inicialmente associado à construção de paredes com espessuras

superiores a 50 cm, é possível construírem-se paredes mais esbeltas, através da adição de cimento ou cal à mistura (AGO, 2003).

1) Resumo das suas características técnico-funcionais

1.1) Processos de construção

Antigamente, as paredes de taipa eram construídas colocando a terra húmida entre dois taipais de madeira desmontáveis, que eram removidos logo após a terra estar completamente seca, formando assim uma parede de um material natural, incombustível e isotérmico. Este processo na sua utilização tradicional implicava prazos de obra muito longos.

Actualmente o processo agilizou-se através da aplicação de cofragens metálicas deslizantes, sistemas mecânicos de compactação da terra e da utilização de sistemas de projecção mecânica. Para este processo, recorre-se quase sempre à terra aditivada com cimento ou cal. As primeiras dificuldades estão em reunir uma terra adequada e garantir boas condições de humidificação, para obter uma compactação eficaz.

No processo construtivo tradicional os utensílios utilizados na construção das paredes são: painéis de cofragem em madeira, pá, enxada, picareta, cavador, balde ou cesto, fita métrica, mangueira de nível, martelo, fio-de-prumo, fio de pedreiro, esquadro, serrote, colher de trolha e pilão em madeira (fig. 5.2).

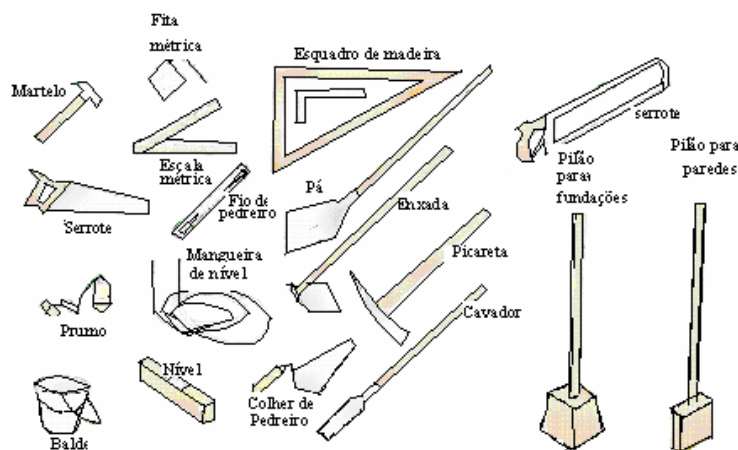



Figura 5.2 – Exemplos de utensílios utilizados no processo de construção tradicional (fonte: IBICT, 2003)

Com a evolução dos conhecimentos técnicos, o Homem foi aprendendo a melhorar as características mecânicas e a durabilidade desta solução construtiva. Essa melhoria é conseguida através da selecção criteriosa do tipo de solo a utilizar, da utilização de aditivos e compactação do solo. De todos os aditivos existentes, o mais utilizado é o cimento Portland.

Nas obras de pequeno porte, a **mistura de terra** apresenta geralmente traço de 1 para 12 – uma parte de cimento para doze partes de solo adequado. A mistura é manual. Em obras de grande porte, a mistura é geralmente mecânica (AGO, 2003).

Sempre que possível, de modo a diminuir a quantidade de energia incorporada no edifício, o solo a utilizar deve ser extraído do próprio terreno de implantação. As **etapas para a preparação da mistura** são as seguintes (IBICT, 2003):

(i) Passar o solo por um peneiro de malha de 4 a 6cm de abertura (fig 5.3);

(ii) Espalhar o solo sobre uma superfície lisa e impermeável formando uma camada de 20 a 30cm. Espalhar o cimento sobre o solo peneirado e revolver bem, até que a mistura fique com uma coloração uniforme, sem manchas de solo ou cimento;

(iii) Espalhar a mistura numa camada de 20 a 30cm de espessura, adicionar água aos poucos, de preferência com um regador de "espelho", sobre a superfície e misturar novamente.

Existem testes práticos para verificar se a quantidade de mistura está correcta (IBICT, 2003):

(i) Encher a mão com a mistura e apertar com muita força. Em seguida abrir a mão. O bolo formado deve apresentar a marca dos dedos com nitidez. Se não apresentar marcas há falta de água na mistura. Nesse caso, deve-se acrescentar, aos poucos, mais água na mistura e repetir o teste até aparecer a marca dos dedos;

(ii) De seguida, deve-se deixar cair o bolo ao chão, de uma altura de cerca de 1m. No impacto o bolo deve desmanchar-se, se isso não ocorrer há excesso de água na mistura. Nesse caso, deve-se espalhar e revolver a mistura para que o excesso de água evapore. Repetir o teste, deixando cair o bolo de novo para verificar se a quantidade de água chegou ao ponto correcto.

Figura 5.3 – Extracção e passagem do solo por um peneiro (fonte: Bertagnin, 1999)

O primeiro passo para se iniciar a construção, consiste na decapagem do terreno e na execução de todos os movimentos de terra necessários à definição das plataformas de trabalhos.

Depois de definidas as plataformas de trabalhos é necessário **delimitar a área de construção** e **implantar as guias** que definem o alinhamento das paredes. Na construção de paredes em terra a delimitação e implantação das guias é uma etapa da maior importância. A distância correcta entre guias vai facilitar os trabalhos de cofragem e o seu prumo garante o prumo das paredes. A delimitação do terreno consiste em esticar quatro linhas, que cercam a área do edifício.

A implantação das guias e delimitação da área são efectuadas do seguinte modo (fig. 5.4 e 5.5) (IBICT, 2003):

(i) Implantar um barrote aprumado no local onde será um dos cantos do edifício. O barrote deve ficar com a altura aproximada de 1m em relação ao chão;

(ii) Pregar um prego até metade, no topo do barrote;

(iii) Montar os cavaletes (balizas). Os cavaletes devem ficar afastados aproximadamente 1m da área da habitação;

(iv) Os travessões de todos os cavaletes devem estar ao mesmo nível (um pouco abaixo da cabeça do prego do barrote). Usar para isso a mangueira de nível;

(v) Esticar a primeira linha numa das direcções do edifício. A linha deve encostar ao de leve no prego do barrote;

(vi) Esticar a segunda linha que cruzará com a primeira exactamente no prego do barrote. Deve-se garantir a esquadria entre as duas linhas através da utilização de um esquadro;

(vii) Medir, sobre as duas linhas, a partir do prego do barrote, a largura e o comprimento da casa e marcar com uma caneta os dois pontos;

(viii) Esticar as outras linhas de forma que cruzem as duas primeiras sobre as marcas de caneta, fazendo também um ângulo recto entre si.

De seguida, efectuam-se covas com uma altura mínima de 40 cm, para a **colocação das estacas**. Devem ser colocadas estacas em todos os cunhais e encontros de paredes. A distância entre a linha e o fundo da cova deve ser a mesma em todas elas. Coloca-se a estaca dentro da cova fazendo-se o enchimento com a mistura de terra. O enchimento deve ser realizado em camadas que não devem ultrapassar os 20cm de espessura, de modo a que a compactação seja facilitada. As estacas são aprumadas durante a compactação.

Depois de implantadas as estacas realizam-se as **fundações**. A marcação dos limites dos lintéis de fundação faz-se riscando no chão, entre duas estacas, duas linhas com afastamento igual à espessura que se pretende atribuir às paredes. Esta linha deve ser centrada a partir do eixo das estacas. Faz-se a escavação do terreno alcançando uma profundidade mínima de 40cm (fig. 5.6).

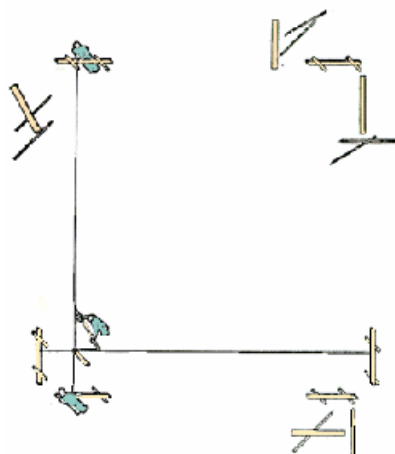



Figura 5.4 – Colocação das guias (fonte: IBICT, 2003)

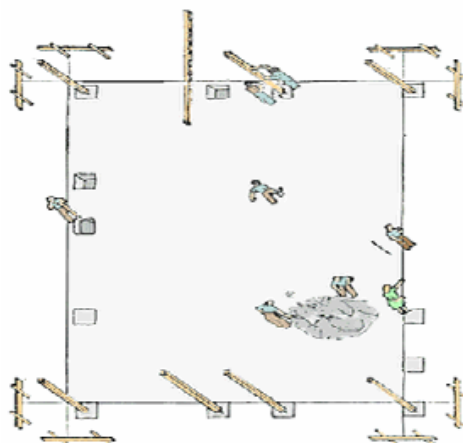



Figura 5.5 – Delimitação da área do edifício (fonte: IBICT, 2003)

Na construção tradicional os lintéis de fundação são realizados com a mistura de terra ou em cascalho. Actualmente, recorre-se a lintéis de betão armado, o que confere melhor estabilidade estrutural ao conjunto e torna esta solução construtiva mais compatível com os códigos de estabilidade estrutural existentes. Se o material escolhido for a mistura de terra, a mistura é vertida nos caboucos em camadas com espessura máxima 20cm, compactando-se muito bem (fig. 5.7).

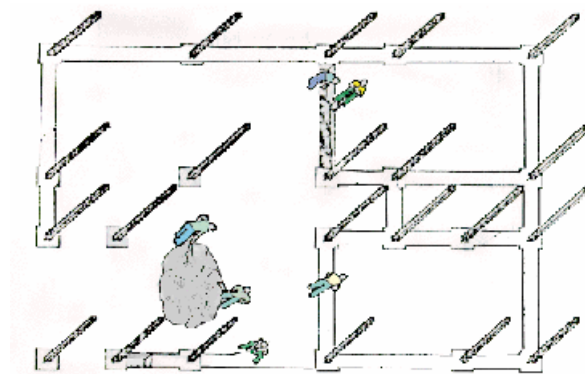



Figura 5.6 – Marcação das fundações e escavação dos caboucos (fonte: IBICT, 2003)

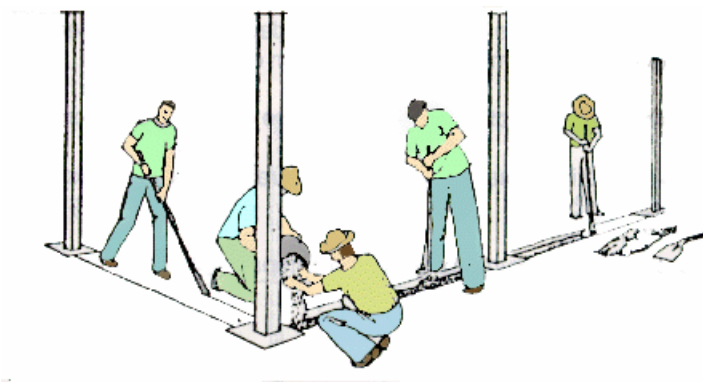



Figura 5.7 – Execução da fundação (fonte: IBICT, 2003)

De seguida, como a habitação deve ficar mais elevada em relação ao terreno, deve-se proceder à compactação de 10cm da mistura, logo após a fundação e antes de se colocar a camada impermeabilizante. Nesta fase, pode-se aproveitar para corrigir pequenas diferenças de nível existentes no terreno (AGO, 2003).

Inicia-se a **elevação das paredes** com a montagem das cofragens (fig. 5.8). Coloca-se a mistura em camadas de 20 cm dentro da cofragem, e compacta-se (fig. 5.9). Quando esta estiver completamente cheia e antes de a desmontar, com uma colher de pedreiro fazem-se ranhuras na superfície, para que o bloco a sobrepor adira convenientemente. A figura 5.10 apresenta resumidamente a sequência de operações em estaleiro para a construção de paredes de taipa.

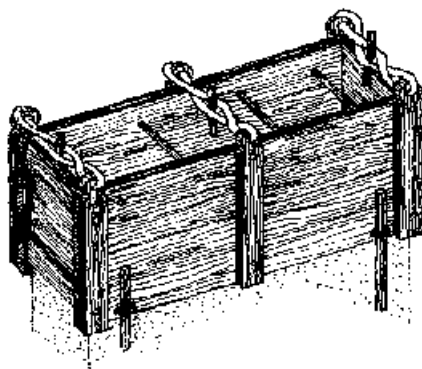



Figura 5.8 – Aspecto do molde de cofragem (fonte: Bertagnin, 1999)

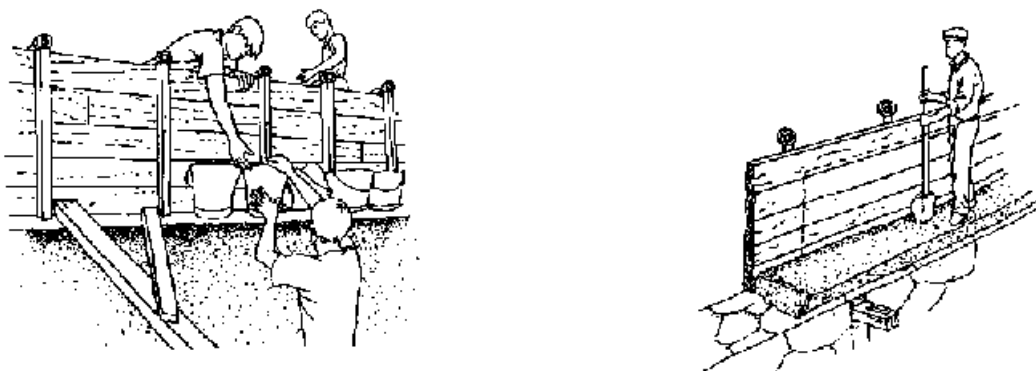



Figura 5.9 – Colocação e compactação da mistura (fonte: Bertagnin, 1999)

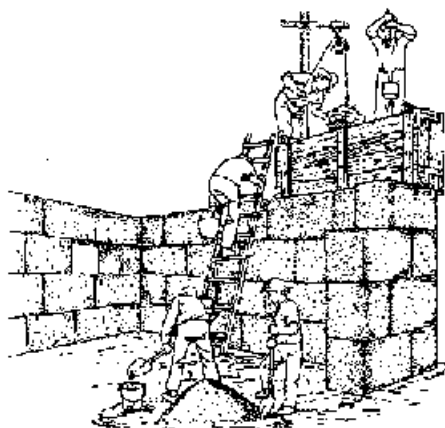



Figura 5.10 – Sequência de operações para a construção em taipa (fonte: Bertagnin, 1999)

Para a construção das **instalações hidráulicas e eléctricas** podem ser utilizados os materiais correntemente usados na construção convencional. Os tubos podem ficar aparentes ou embebidos nas paredes. Se se optar por tubagens embebidas, os rasgos devem ser abertos antes das paredes completarem 10 dias, ou logo após a compactação (AGO, 2003).

Ao nível do **revestimento**, devido à qualidade de acabamento das paredes, estas podem ser apenas pintadas com uma tinta à base de cimento para aumentar a sua impermeabilidade e as condições de conforto e higiene (AGO, 2003).

1.2) Aparência

A aparência deste tipo de paredes é determinada pelo tipo de terra e agregados utilizados (fig. 5.11 e 5.12). O processo de compactação por camadas pode causar estratificação horizontal. Os agregados podem ficar expostos na superfície do paramento, podendo embelezar o acabamento da parede: pode-se utilizar agregados com colorações diferentes nas diversas camadas. Escovando-se a superfície do paramento é possível apagar as marcas dos moldes de cofragem.

Figura 5.11 – Construção abandonada em taipa, situada no Sul de Portugal (fonte: Pinho, 2001)

Figura 5.12 – Construção em taipa (Otorohonga, Nova Zelândia)

1.3) Capacidade mecânica

A resistência das paredes de taipa à compressão é elevada, o que torna esta solução adequada a edifícios de paredes resistentes, com vários pisos. O comportamento sísmico das paredes em taipa, é melhor de que o comportamento das alvenarias resistentes de tijolos ou blocos, pois enquanto que na primeira as paredes funcionam como um elemento monolítico, nas restantes, a parede é constituída por um elevado número de elementos. Em situações em que se pretenda aumentar a resistência da taipa, é possível utilizar armaduras tal como na construção em betão armado. No entanto, a colocação de varões horizontais não é recomendável e os varões horizontais podem causar problemas de fissuração (AGO, 2003).

1.4) Comportamento térmico

A **inércia térmica** desta solução construtiva é elevada, sendo semelhante, devido à sua elevada massa, à das paredes em alvenaria de pedra.

Em paredes com espessuras correntes, o **isolamento térmico**, ao contrário da inércia térmica, é insuficiente. Apesar de não ser uma solução intrínseca desta tecnologia, o cumprimento das características regulamentares de comportamento térmico de edifícios, só se torna possível através da aplicação de revestimentos isolantes. O isolamento térmico pode ainda ser melhorado aumentado a espessura das paredes, mas esta solução para além de aumentar o custo, altera as propriedades mecânicas da parede e o peso da construção.

1.5) Isolamento sonoro

Uma das soluções para garantir um bom isolamento sonoro é utilizar soluções construtivas monolíticas, o que é uma característica da taipa. Para além de ser uma solução monolítica, a sua elevada massa amortece a transmissão das ondas sonoras, o que torna a taipa um bom isolante sonoro. Os espaços envolvidos por paredes de taipa sem revestimento possuem excelentes

características de reverberação. A taipa possui um coeficiente de absorção sonoro superior ao das paredes convencionais, o que evita os incómodos ecos.

1.6) Resistência ao fogo e aos microorganismos

Não existem componentes inflamáveis na taipa, pelo que a sua resistência ao fogo é muito boa. Como não existem cavidades para albergar microorganismos e não existe nada no material que os atraia, a sua resistência ao ataque de microorganismos é bastante elevada.

1.7) Durabilidade e resistência à humidade

Esta tecnologia já é utilizada há milhares de anos, existindo exemplos de edifícios, com vários séculos de existência, que ainda se encontram em perfeito estado de conservação. Geralmente a taipa apresenta elevada durabilidade, mas devido à natureza porosa da terra, esta deve ficar protegida da chuva e não deve ficar exposta a longos períodos de humidificação. É essencial proteger o topo da parede da humidade da chuva e a sua base da humidade do terreno. A exposição continuada à humidade pode degradar a estrutura interna da taipa, pois a humidade reverte os processos de estabilização com cimento e permite expansão da argila. A resistência à humidade pode ser melhorada através da utilização de aditivos impermeabilizantes em paredes muito expostas à humidade. No entanto, a utilização destes aditivos compromete a permeabilidade destas paredes ao ar e ao vapor de água, pelo que deve ser evitada.

1.8) Toxidade

A taipa normalmente não apresenta qualquer efeito pernicioso para a saúde dos ocupantes, visto ser executada a partir de um material natural. No entanto, em certos casos, utilizam-se aditivos impermeabilizantes ou materiais de acabamento nas paredes que podem comprometer esta característica. A solução ideal passa pela utilização da terra no seu estado mais natural possível.

1.9) Sustentabilidade ambiental

A taipa apresenta baixo impacte ambiental, dependendo da quantidade de cimento utilizado nos processos de estabilização e da distância ao local onde é extraída a terra (AGO, 2003). Deve-se utilizar, sempre que possível, terra extraída do próprio terreno onde vai ser construído o edifício. Em misturas com baixa quantidade de cimento, a energia incorporada e as emissões de gases de efeito estufa (GEE´s) associados, são muito reduzidas.

1.10) Construtibilidade, disponibilidade e custo

Nesta tecnologia, todas as operações de construção têm de ser realizadas “in-situ”. No entanto, não existem grandes dificuldades na sua construção, podendo-se utilizar mão-de-obra com baixo grau de qualificação.

Os materiais básicos necessários a esta solução estão disponíveis praticamente em todo o lado, mas o cimento e as cofragens podem ter de ser transportados em longas distâncias, aumentando os custos ambientais e económicos. Antes de se utilizarem materiais locais deve-se verificar, através de ensaios, se são ou não adequados a esta solução construtiva. O tipo de mistura a utilizar também depende da terra que se utiliza. O custo de construção de edifícios de qualidade

em taipa é semelhante ao custo de construção em alvenaria resistente de pedra. O custo de construção é relativamente elevado devido ao elevado controlo de qualidade requerido na extracção do material, à elevada carga de mão-de-obra necessária e à quantidade de trabalhos de cofragem necessários. A taipa tradicional, onde a compactação é executada através do trabalho humano e onde se utiliza cofragens de madeira, pode ser de baixo custo e de baixo consumo energético, não sendo, no entanto, uma opção realística.

5.1.3.2. Adobe

O adobe é uma técnica de construção em terra onde são utilizados blocos de terra crua moldados. O termo "adobe" provém do vocabulário Árabe e Berber e foi implementado na Península Ibérica quando os povos do Norte de África dominavam esta zona do continente europeu.

Para se executarem os blocos (adobes), em primeiro lugar realiza-se uma mistura de terra e água que é colocada em moldes com as dimensões que se pretende atribuir aos blocos (fig. 5.13). Posteriormente os blocos ficam a secar ao ar livre (naturalmente). Os adobes podem ser produzidos a partir de terra líquida ou plástica, utilizando moldes muito diversos (Lourenço, 2003).

Figura 5.13 – Processo tradicional de fabrico de adobes (fonte: Lourenço, 2002)

Figura 5.14 – Construção de parede em adobe (fonte:Construdobe)

Os processos de fabrico actuais, referem-se à possibilidade de utilização de aditivos para a estabilização da terra e à utilização de moldes pré-fabricados e estandardizados. Quando se pretende melhorar a resistência dos adobes, nomeadamente à tracção, são adicionadas fibras à mistura. As fibras naturais, principalmente a palha, são as tradicionalmente utilizadas, mas podem-se utilizar outras fibras, como as metálicas e as fibras de vidro.

As paredes de adobe são construídas segundo as mesmas regras que as paredes de alvenaria de tijolo. Os blocos são assentes com argamassa de terra (fig. 5.14). Para que a argamassa das juntas de assentamento tenha o mesmo comportamento dos blocos, esta deverá ser executada com o mesmo traço.

Este tipo de técnica construtiva é caracterizada por incorporar baixa quantidade de energia pois, a energia utilizada é a desenvolvida pelo trabalho humano na execução dos blocos e no seu assentamento, e a energia solar na cura dos blocos. A baixa energia incorporada, bem como o baixo impacte ambiental produzido na devolução deste material, no final da vida útil das construções, à natureza, potenciam a utilização deste material num projecto ambientalmente sustentável. O ressurgimento desta técnica construtiva teve origem na melhor interpretação dos seus méritos e na aceitação das suas reservas.

1) Resumo das suas características técnico-funcionais

1.1) Processos de construção

Sempre que possível, de modo a diminuir a energia incorporada na solução construtiva (ver capítulo III – 3.2.2.2), a terra a utilizar deve ser extraída do próprio terreno onde será implantada a construção. Assim, o primeiro passo neste tipo de solução pode envolver escavações no terreno para a extracção da terra.

A quantidade de argila presente na terra deve estar situada no intervalo de 30 a 70 por cento do conteúdo total (AGO, 2003). Existe um certo número de ensaios que permitem aferir as propriedades do solo e a sua adequação a este tipo de solução construtiva. Antes de se iniciarem as escavações necessárias à extracção da matéria-prima deve-se escolher o local, tendo em consideração a minimização das distâncias de transporte. Depois de escolhido o local deve-se remover a camada de solo vegetal (decapagem). O solo vegetal deve ser armazenado de modo a poder ser utilizado nos espaços verdes.

As dimensões dos blocos são variáveis e condicionadas pelas dimensões dos moldes utilizados. No entanto, não se pode esquecer que quanto maiores forem os blocos, maior será a necessidade de se recorrer a meios mecânicos no seu transporte e assentamento, aumentando assim a incorporação de energia. Podem ser realizados blocos com uma determinada forma para serem conectados aos elementos estruturais ou para acomodarem instalações eléctricas e canalizações. O comportamento mecânico do adobe pode ser melhorado através da sua estabilização com fibras vegetais (p.e. palha), cimento, cal ou betume. Os processos de construção são do tipo artesanal, incorporando grande quantidade de mão-de-obra.

Ao nível das **fundações**, é possível que estas sejam executadas em cascalho, sendo esta a solução tradicional. No entanto, recorrendo a este tipo de solução dificilmente se satisfazem as exigências regulamentares existentes nesta matéria. Assim, é actualmente corrente o recurso a lintéis de betão armado ou à execução de uma laje em betão armado (ensoleiramento geral). O ensoleiramento geral permite a definição de uma plataforma limpa e nivelada para a produção dos blocos.

Os adobes podem ser utilizados em **alvenarias estruturais** ou **não estruturais**. No caso das alvenarias não estruturais tem de se recorrer a uma estrutura resistente porticada, que na maior parte das vezes, é em madeira ou em aço. Esta solução, relativamente à primeira, apresenta a vantagem de antes de se iniciar o assentamento dos blocos de terra se poder construir a cobertura do edifício, o que protege a produção dos blocos e o seu assentamento da chuva. Dentro das desvantagens, destaca-se a dificuldade existente na ligação dos blocos aos elementos estruturais (AGO, 2003).

No caso das alvenarias resistentes em adobe, assim como nas demais alvenarias resistentes, deve ser estudada uma solução adequada de **contraventamento** para as paredes, pois a sua resistência quando solicitadas por cargas perpendiculares ao seu plano é bastante reduzida. O contraventamento das paredes deve ser garantido através da existência de ligações verticais com as paredes com que contactam (imbricamento), e com ligações horizontais, através da sua ligação às lajes.

1.2) Aparência

A aparência dos elementos construídos em adobe reflecte o material em que são executados. A sua cor é geralmente determinada pela cor das partículas de argila e da areia utilizada na mistura (fig. 5.15 e 5.16). Nas paredes executadas com este material ficam geralmente evidenciadas as formas dos blocos de adobe, o que origina um padrão muito similar ao das paredes executadas/revestidas com tijolos de barro maciços.

Figura 5.15 – Fachada em adobe de um edifício na Austrália

Figura 5.16 – Edifício em adobe, construído no Sul de Portugal (fonte: Pinho, 2001)

1.3) Comportamento estrutural

As paredes em adobe podem ser executadas com várias espessuras. Através da compatibilização da espessura das paredes com as cargas a que estão sujeitas é possível executarem-se edifícios com vários pisos. A construção de arcos permite a utilização do adobe em situações bem diferentes do que em simples elementos verticais. Os blocos de terra podem ser utilizados em paredes não resistentes, por exemplo, na construção com estrutura de madeira, ou como paredes de carga (resistentes), devendo-se, no entanto, ter em atenção que a sua resistência à compressão é relativamente baixa. Na sua maior parte, os edifícios existentes em Portugal, que foram executados nesta tecnologia não possuem mais do que um piso. No entanto, no Iémen é possível observarem-se edifícios constituídos com 8 e mais pisos, construídos já alguns séculos e que permanecem estáveis.

1.4) Comportamento térmico

A construção em terra é caracterizada por possuir uma elevada massa por unidade de superfície. Os edifícios que empregam esta tecnologia possuem assim elevada inércia térmica, o que a torna

adequada a regiões onde as amplitudes térmicas diurnas são significativas (ver capítulo III – 3.2.1.3). A elevada inércia térmica actua como volante de inércia nas mudanças de temperatura do interior dos edifícios, atrasando o aquecimento dos espaços interiores quando a temperatura exterior é mais elevada e diminuindo o ritmo com que a temperatura interior baixa durante a noite, através da libertação da energia armazenada nas paredes durante o dia.

Ao contrário do que tradicionalmente se julga, os blocos de terra não são bons isolantes térmicos, pois possuem condutibilidade térmica próxima dos 1,3 W/m.ºC. Como os adobes são densos, estes possuem porosidade reduzida pelo que a transferência de calor se encontra facilitada. Apesar de não ser uma solução tradicional, é possível aplicarem-se revestimentos termicamente isolantes neste tipo de paredes de modo a melhorar o seu comportamento térmico. Se a concepção do edifício o permitir é também possível, em certos climas, prescindir por completo dos sistemas de isolamento.

1.5) Isolamento sonoro

Uma parede em adobe bem construída apresenta bom isolamento sonoro devido à sua elevada massa. O seu comportamento acústico é em tudo semelhante ao comportamento de uma parede monolítica de elevada massa (AGO, 2003).

1.6) Resistência ao fogo e aos microorganismos

Sabendo-se que a terra não é inflamável e que nas paredes de terra não estão criadas as condições para o desenvolvimento de microorganismos, pois não existem cavidades para os albergar nem o necessário substrato para os atrair, facilmente se compreende que a resistência ao fogo e aos microorganismos do adobe é elevada.

1.7) Durabilidade e resistência à humidade

As paredes em adobe mantêm a sua estabilidade estrutural durante séculos, desde que devidamente protegidas contra as condições climáticas mais severas – por exemplo, através da existência de beirais nos telhados e de sistemas de drenagem das águas pluviais e/ou através de uma manutenção adequada. No Iémen, muitos edifícios centenários ainda existem devido aos processos continuados de manutenção. Regra geral, o adobe necessita de uma adequada protecção contra a chuva forte e não deve ficar exposto durante muito tempo a teores de humidade elevados.

1.8) Toxidade

Os blocos de terra normalmente não apresentam qualquer efeito pernicioso para a saúde, visto serem executados a partir de um material natural. No entanto, em certos casos, as propriedades do adobe são melhoradas através da adição de betumes na sua mistura, o que potencialmente resulta na libertação de compostos orgânicos voláteis. A solução ideal passa pela utilização da terra no seu estado mais natural possível.

1.9) Sustentabilidade

Ao nível da sustentabilidade ambiental não existe outro material que potencie tão baixo impacte ambiental como o adobe. O adobe não deverá conter qualquer matéria orgânica – os blocos devem ser constituídos apenas por argila e areia, não devendo conter solo vegetal. Para a sua execução é necessária pouca energia, pelo que a energia incorporada neste tipo de construção é, na maior parte das vezes, bastante baixa. No entanto, nesta técnica é utilizada uma grande quantidade de água. Apesar da energia incorporada no adobe ser a mais baixa entre os materiais de construção conhecidos, a utilização de aditivos, o transporte excessivo e a utilização de certos meios mecânicos; podem aumentar a incorporação de energia na construção de terra. Com a baixa incorporação de energia, as emissões de gases de efeito estufa (GEE's) associados a esta solução são muito reduzidas.

1.10) Construtibilidade, disponibilidade e custo

Apesar do adobe ser uma solução construtiva tradicional, com a actual hegemonia do betão armado e da alvenaria de tijolo, existem poucas empresas de construção em Portugal com os adequados conhecimentos técnicos para trabalharem com esta solução. As empresas existentes são em baixo número e estão geralmente especializadas no sector da reabilitação do património histórico nacional. A existência de um baixo número de empresas com técnicos preparados para lidarem com esta solução construtiva constitui uma desvantagem competitiva relativamente à solução convencional. No Sul do país, nomeadamente no Algarve, existe uma empresa de construção especializada em sistemas construtivos em adobe que produz os componentes necessários a este tipo de construção: blocos de adobe com tamanhos diversos, blocos de adobe leves com cortiça, elementos para arcadas, reboco pré-doseado, argamassa pré-doseada, entre outros).

A **matéria-prima** necessária para a produção dos blocos de terra é abundante e em alguns locais é possível produzirem-se os blocos recorrendo ao solo do próprio terreno onde vai ser edificada a construção.

Apesar da matéria-prima utilizada neste tipo de solução ser bastante barata, o facto de se utilizarem técnicas artesanais com a elevada incorporação de mão-de-obra nas fases de fabrico dos blocos e assentamento, este tipo de construção só se torna efectivamente mais económica se for executada pelos próprios utilizadores (autoconstrução). Existem actualmente algumas empresas especializadas na produção de blocos de terra, mas o seu preço é tão elevado, e às vezes até superior ao preço dos tijolos.

Segundo uma empresa nacional especializada neste sector, o custo de construção relacionado com esta solução é superior em 10% ao custo médio da construção convencional (Construdobe, 2003).

5.1.3.3. BTC

O BTC – bloco de terra comprimido – é o descendente moderno do bloco moldado de terra, conhecido tradicionalmente por Adobe. A ideia de compactar a terra de modo a melhorar a qualidade e *performance* dos blocos moldados de terra não é nova, e foi através da utilização de

pilões de madeira que se produziram os primeiros blocos de terra comprimida. Este é um processo ainda bastante comum em algumas partes do globo.

Pensa-se que as primeiras máquinas para a compactação de terra surgiram no século XVIII, em França, através do inventor François Cointeraux. Este inventor desenvolveu um equipamento denominado por "crecise" através da adaptação de uma prensa usada na produção de vinho para a compactação de terra (Rigassi, 1985).

Foi no entanto a partir de meados do século XX, mais propriamente em 1952, que se deu o grande impulso na utilização do BTC na Construção. Nesse ano, no âmbito de um programa de pesquisa sobre a habitação rural na Colômbia, foram aperfeiçoadas as técnicas de aplicação deste produto na Construção e foi desenvolvido, pelo engenheiro Raul Ramirez, um equipamento prático e de dimensões reduzidas denominado por prensa CINVA-RAM. Este equipamento foi disseminado por todo o mundo (Rigassi, 1985).

As suas características técnico-funcionais são em tudo semelhantes às do adobe. A principal diferença, reside no facto do adobe atingir a sua resistência máxima após sofrer um processo de cura, enquanto o BTC atinge a sua resistência máxima com a compactação da prensa. A compactação da terra com uma prensa melhora as qualidades do material, pois se por um lado as formas dos blocos ficam mais regulares, por outro a superior densidade torna maior a resistência à compressão, bem como a resistência à erosão e à degradação através do contacto com a água.

Este método é aquele que implica prazos de construção mais curtos, pois praticamente não exige tempo de espera entre a produção e aplicação do material. A produção pode ser assegurada todo o ano, independente das condições climatéricas.

A eficácia e a simplicidade do sistema de produção de blocos garantiram o seu sucesso e a difusão por todo o mundo, sendo actualmente um dos métodos de construção em terra mais utilizados (Lourenço, 2002).

5.1.4. Factores limitadores

Vários factores contribuíram para o abandono da construção em terra face ao surgimento do betão armado no início do século XX. As vantagens do betão em relação à terra eram evidentes, o novo material permitia uma excelente resistência mecânica, variedade de formas, prazos de construção mais curtos e à partida o comportamento face à água melhorava significativamente.

O principal inconveniente da construção em terra é a **rápida degradação do material sobre a acção das intempéries**. A terra em contacto com a água apresenta durabilidade bastante reduzida.

É possível reduzir a acção da água construindo boas fundações, elevando-as até uma altura segura, protegendo a construção com uma boa cobertura e protegendo as paredes com um revestimento uniforme.

Relativamente à anomalia humidade, esta deve ser tratada como nas construções correntes. Se a água entrar nas paredes mas seguidamente evaporar não é grave. Se a água que penetra nas paredes não consegue sair, começa a degradação dos materiais.

O princípio básico de construir em terra é evitar o contacto entre as paredes e o solo. A terra, mesmo quando estabilizada com cimento, é susceptível à acção da água, a qual diminui a sua capacidade de resistência. A possibilidade da ascensão de água nas paredes através de fenómenos de capilaridade deve ser prevista e evitada, através das técnicas correntes de construção, como a utilização de um solo bem compactado e estável, a previsão de sistemas eficazes de drenagem de águas periféricas e/ou a execução de barreiras pára-vapor entre a fundação e o início da parede de terra.

O **comportamento mecânico** da terra à compressão não é tão bom como certos materiais estruturais utilizados actualmente, para além de não resistir praticamente a esforços de tracção e flexão. Tendo em conta os padrões actuais de segurança na construção, não será lógico nem sensato fazer uma apologia da construção em terra pura, sem recorrer a outros materiais complementares.

Os problemas estruturais surgem normalmente associados a uma má concepção estrutural ou a solicitações muito fortes, tais como sismos, movimentos das fundações, tufões, etc.

As fissuras de retracção devem-se sobretudo ao facto de se negligenciar o controlo da qualidade da terra empregue ou os processos de construção (terra demasiado argilosa, secagem excessivamente rápida, etc.).

As principais causas de anomalias estruturais são (Lourenço *et al*, 2001):

- Material solicitado por esforços de tracção e flexão;
- Longos períodos de contacto com humidade ou água, o que destrói a resistência do material;
- Construção sobre um terreno com fraca capacidade de carga;
- Má concepção – fundações sub-dimensionadas, excentricidade da estrutura, paredes não travadas, sobrecarga na cobertura, punçoamentos locais;
- Terra de fraca qualidade;
- Sistemas construtivos mal executados.

Uma construção em terra só terá sucesso se durante a sua concepção e construção forem observadas as suas limitações. Assim, são normalmente tidos em especial consideração aspectos como (Lourenço *et al*, 2001):

- Escolha criteriosa do local de implantação;
- Maior cuidado na escolha dos materiais e na produção;
- Para minimizar o efeito das cargas horizontais, são utilizados determinados padrões eficazes de aplicação das peças, para garantir uma correcta relação entre as juntas de fiadas;

- Para edifícios de grande desenvolvimento em planta, as paredes são seccionadas, para formar vários elementos independentes;
- Escolha de formas e concepção arquitectónica apropriada; a assimetria das formas, tanto em planta como em elevação, bem como as assimetrias na massa e na rigidez devem ser evitadas; as plantas devem ser preferencialmente compactas e de formas quadrangulares ou circulares;
- A execução de fundações apropriadas;
- As armaduras horizontais (varões de aço, varas de madeira ou canas), a existirem, devem estar dispostas aproximadamente de 50 em 50cm;
- A área das aberturas será a estritamente necessária e não deverá exceder 15% a 20% da superfície das paredes;
- A largura de cada abertura será limitada a 35% do comprimento da parede;
- As paredes devem ser ligadas por um lintel de coroamento contínuo, resistente à tracção e durável;
- Devem ser criados reforços nas zonas dos cunhais/ângulos;
- A cobertura deve ser o mais leve possível e deve-se tentar reduzir, o mais possível, as cargas sobre as paredes; a cobertura deverá estar bem ligada às paredes.

5.1.5. Vantagens e inconvenientes

No quadro 5.1 são apresentadas as principais vantagens e inconvenientes das paredes de terra em relação às paredes convencionais de alvenaria de tijolo furado.

Quadro 5.1 – Principais vantagens e inconvenientes das paredes de terra

Vantagens	Inconvenientes
• Mais económica (na maior parte das vezes e em países com mão-de-obra barata);	• Rápida degradação sob a acção das intempéries;
• Matéria-prima abundante e natural;	• Condições de trabalho em estaleiro;
• Necessidade de poucos recursos energéticos;	• Técnica de montagem não convencional;
• Facilidade na execução das instalações hidráulicas e eléctricas;	• Grande quantidade de mão-de-obra;

Quadro 5.1 (cont.) – Principais vantagens e inconvenientes das paredes de terra

Vantagens	Inconvenientes
• Excelente isolamento acústico; • Inércia térmica elevada (em zonas climáticas com grandes amplitudes térmicas); • Não necessita de reboco; • Reciclável/reutilizável; • Incombustível; • Não-tóxica.	• Edifícios de elevada massa. • Inércia térmica elevada (em edifícios em que o aquecimento não é realizado continuamente).

5.2. Sistemas construtivos em estruturas metálicas leves (Light Gauge Steel Framing – LGSF)

5.2.1. Introdução

Como já se referiu, o material abundantemente utilizado em Portugal na execução da estrutura dos edifícios é o betão armado. Ao longo de décadas de utilização deste material foram sendo identificados os seus inconvenientes. Na fase de construção, os trabalhos em betão armado são responsáveis pela produção de grandes quantidades de desperdícios, sendo uma das maiores fontes de resíduos na construção convencional. Por outro lado, o betão no final do seu ciclo de vida não apresenta grandes potencialidades de vir a ser reciclado, a não ser através de processos muito complexos e dispendiosos que necessitam de grande quantidade de energia, o que torna este material incompatível com os desígnios de sustentabilidade da construção.

A necessidade de se caminhar no sentido da construção sustentável engloba, como já foi referido, uma série de medidas. Algumas dessas medidas passam pela utilização de novos materiais e tecnologias de construção mais avançadas. As estruturas leves procuram responder a essa demanda, através da diminuição do consumo de matéria-prima na construção, da utilização de materiais construtivos mais ecológicos e da superior industrialização do processo construtivo.

Os sistemas construtivos em estruturas metálicas leves (LGSF) são uma das soluções que surgiram em resposta aos desígnios da construção sustentável. Este tipo de tecnologia pode ser utilizada na execução de paredes exteriores, paredes interiores, lajes e coberturas, em todo o tipo de construção de edifícios até 2 a 3 pisos de altura, sejam eles moradias unifamiliares, edifícios multifamiliares, edifícios comerciais e industriais, e em obras de remodelação.

O aço estrutural é uma solução muito utilizada no ramo da construção civil, estando muitas vezes associado à construção de pontes e arranha-céus. Este material, por ser mais resistente que o betão armado, permite a execução de elementos estruturais de menor secção e, por conseguinte,

de menor massa, o que permite a construção de estruturas mais leves e de maiores dimensões, que consomem menor quantidade de matéria-prima. Por outro lado, ao contrário do betão armado, no final da vida útil das construções, o aço pode ser facilmente reutilizado ou reciclado.

Este sistema é caracterizado por um nível de industrialização superior ao da construção convencional em betão armado, pois grande parte dos elementos é produzida em fábrica e não em estaleiro, o que diminui o período de tempo necessário à construção, reduz a carga necessária de mão-de-obra e de equipamento pesado, aumenta as condições de segurança e higiene no estaleiro e diminui a quantidade de desperdícios.

No sistema LGSF, o aço é o principal material utilizado na estrutura do edifício a construir (fig. 5.17). Esta é constituída por peças pré-fabricadas, obtidas a partir da moldagem a frio de chapa de aço galvanizado de baixa espessura, resultando num peso total dos elementos estruturais bastante baixo. Daí a designação Light Gauge Steel Framing, ou seja, estruturas leves de aço.

Figura 5.17 – Aspecto de um edifício LGSF durante a fase de construção e após a sua conclusão (fonte: 2Mil Aço, 2003)

5.2.2. Resumo das características técnico-funcionais

5.2.2.1. Constituição

1) Estrutura

O material utilizado na concepção estrutural dos edifícios construídos com sistemas LGSF é o aço galvanizado. Os montantes e vigas utilizados na construção destes edifícios são obtidos a partir de chapas de aço galvanizado por imersão em zinco quente.

O processo de obtenção dos perfis passa pelo corte das bobines de aço em tiras de menor largura, sendo a chapa então moldada a frio para a forma desejada. Os formatos usados são obtidos por quinagem ou perfilagem, sendo as formas básicas usuais o canal de abas simples – conhecido por "perfil U", o de abas compostas – usualmente chamado de "perfil C" (fig. 5.18) e o "perfil Z".

Figura 5.18 – Perfis "tipo C" utilizados na estrutura de sistemas construtivos LGSF

O aço geralmente utilizado é o Fe 280 ou o Fe 360 e a secção das peças, bem como a sua espessura, dependem do tipo de cargas a que o edifício estará sujeito. Nas paredes é comum utilizarem-se peças de altura entre os 90 e os 140mm e espessura entre os 0,8 e 2 mm, enquanto que nas lajes a altura mínima é 150mm e a máxima pode atingir os 300mm e a espessura varia entre 1,5mm e 4mm (fonte: 2Mil Aço, 2003).

Uma das questões que suscita um maior número de preocupações quando se utiliza este sistema construtivo é a ligação dos diversos elementos individuais que compõem a estrutura, de modo a que o conjunto funcione monolíticamente.

Nos sistemas LGSF, a ligação entre os diversos elementos é geralmente mecânica, sendo conseguida por aparafusamento. Também é possível ligar as peças por soldadura o que, no entanto, torna mais complexo o desmantelamento do edifício no final da sua vida útil. Nas ligações por aparafusamento, as peças metálicas que constituem a estrutura são ligadas entre si através de parafusos de aço galvanizado, auto-perfurantes e auto-roscantes, isto é, os parafusos abrem o seu próprio orifício quando estão a ser aplicados e não necessitam de porca. Também os materiais que revestem a estrutura, tanto pelo interior, como pelo exterior, são fixos com parafusos.

São utilizados vários tipos de parafusos, em função do tipo de elemento que se pretende ligar, diferindo essencialmente no comprimento e espessura, tal como no formato da cabeça ou da broca. A figura 5.19 apresenta alguns tipos de parafusos utilizados na ligação dos diversos componentes deste sistema.

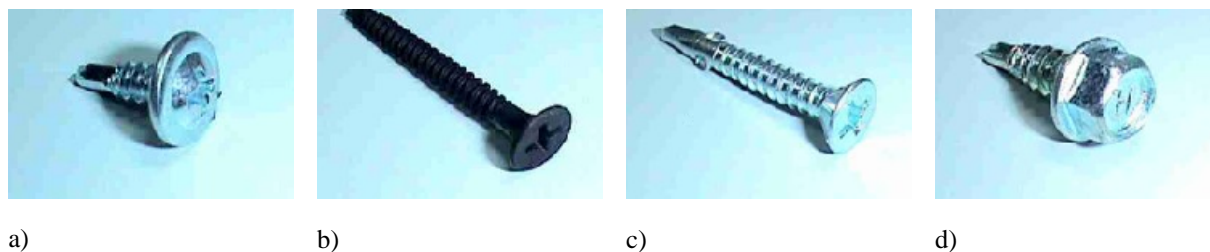



Figura 5.19 – Parafusos utilizados para ligar os diferentes produtos que compõem as diferentes soluções construtivas: a) parafuso para perfis; b) parafuso para gesso cartonado; c) parafusos para placas OSB (Oriented Strand Board); d) parafuso para vigas

2) Parede exterior

A parede exterior é constituída por uma série de camadas, de modo a satisfazer as exigências funcionais que lhe são conferidas (fig. 5.20).

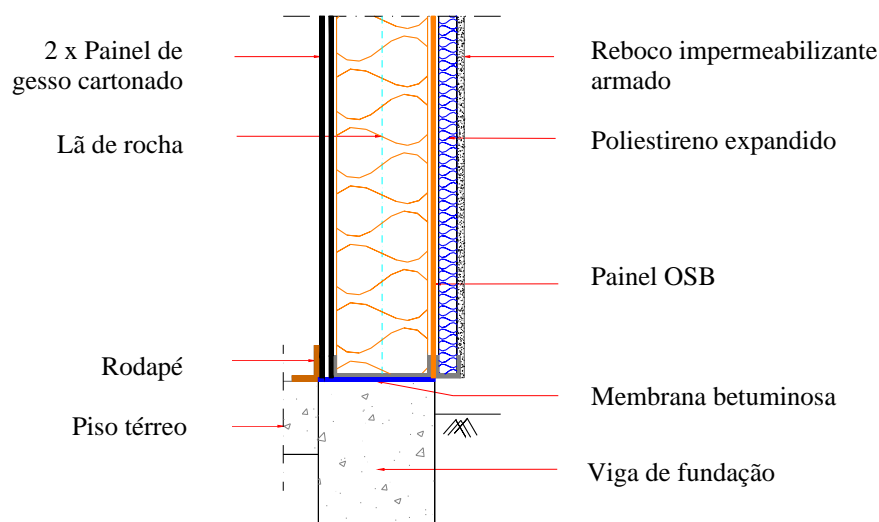



Figura 5.20 – Representação esquemática de uma possível solução construtiva para as paredes exteriores no sistema LGSF

O **revestimento exterior** baseia-se em sistemas compósitos de isolamento térmico exterior, com revestimento aplicado sobre isolante[1]. A base de revestimento, também conhecida por revestimento estrutural, é geralmente constituída por painéis OSB (Oriented Strand Board),

[1] Também conhecido por ETICS – do inglês: "External thermal insulation systems with rendering"

podendo também ser executada em painéis de aglomerado de madeira e cimento. Os painéis OSB, tal como o próprio nome indica, são constituídos por fibras de madeira orientadas.

Do interior para o exterior, o revestimento exterior é constituído pela base de revestimento (painéis OSB ou de aglomerado de madeira e cimento), seguida por placas de isolamento térmico – geralmente de poliestireno expandido (EPS) fixadas mecanicamente à base de revestimento, e por fim, por camada de revestimento espesso de ligantes minerais, armados (rebocos armados) com rede metálica ou de fibra de vidro.

O **revestimento interior** das paredes exteriores, tal como o revestimento das paredes interiores, é realizado através de painéis de gesso cartonado. O revestimento interior pode, em função das características que se pretende atribuir à parede, ser constituído pela sobreposição de dois ou mais painéis de gesso cartonado. O gesso cartonado pode depois ser revestido por qualquer tipo de outro material, como azulejos ou tinta.

Ao nível do **isolamento sonoro**, a baixa massa deste tipo de solução, torna praticamente desprezável o efeito da massa da parede na dissipação da energia sonora que é absorvida pela parede. Assim, o nível adequado de isolamento sonoro só é atingido através da introdução de materiais absorventes de elevadas espessuras, como por exemplo, mantas ou placas de lã mineral (lã de rocha) ou lã de vidro. O material mais utilizado neste tipo de solução é a lã mineral.

A lã mineral é colocada na cavidade existente entre o revestimento dos dois paramentos. Este material, para além de melhorar o comportamento acústico, é também **isolante térmico**, complementado a acção do isolante térmico em placas contínuo pelo exterior. O isolamento térmico contínuo pelo exterior corrige as pontes térmicas que existiriam ao nível dos elementos estruturais.

3) Paredes interiores

As paredes interiores são do tipo *sanduíche*, revestidas com painéis de gesso cartonado nas duas faces, em que o seu interior é preenchido com material absorvente acústico, normalmente lã mineral (fig. 5.21).

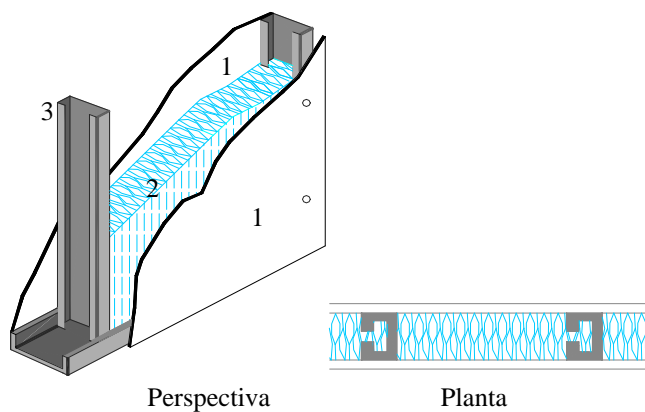



Figura 5.21 – Representação esquemática da solução construtiva das paredes interiores dos sistemas LGSF: 1- painel de gesso cartonado; 2 - lã de rocha; 3 - estrutura da parede.

4) Lajes de piso

Para as lajes de piso, existem várias soluções. As soluções variam ao nível do revestimento estrutural e do tipo de perfis utilizados, que em alguns casos com sobrecargas significativas, poderão ter de ser laminados. As figuras 5.21 e 5.22 apresentam dois pormenores de laje de piso LGSF.

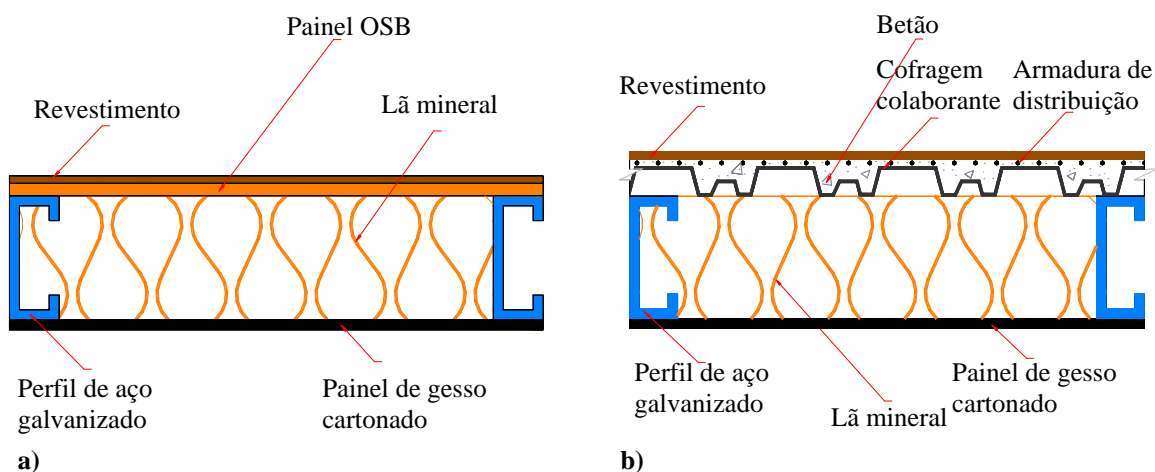



Figura 5.21 – Representação esquemática de laje do sistema LGSF. a) com revestimento estrutural em painéis OSB; b) com revestimento estrutural em chapas de cofragem colaborante

Geralmente, o **revestimento estrutural** é realizado através de painéis OSB, podendo-se também utilizar painéis de aglomerado de madeira e cimento e painéis metálicos de cofragem colaborante

com laje de betão armado de pequena espessura. A solução dos painéis metálicos de cofragem colaborante, apesar de ser a menos utilizada e a pior ao nível das potencialidades de reutilização e reciclagem dos materiais que compõem a laje, é a melhor para zonas climáticas de grande amplitude térmica, pois a sua superior massa pode compensar a baixa inércia térmica das paredes. Por outro lado, esta solução apresenta superior capacidade mecânica e melhor isolamento sonoro. Sobre o revestimento estrutural pode ser realizado qualquer tipo de revestimento de acabamento.

O **tecto** é executado com painéis de gesso cartonado. O **comportamento térmico** e **sonoro** da laje podem ser melhorados através da interposição de lã mineral entre o tecto e o revestimento estrutural.

5) Cobertura

A cobertura pode ser plana ou inclinada. A solução para a **cobertura plana** é estruturalmente semelhante à das lajes de piso, sendo neste caso necessário reforçar o isolamento térmico e introduzir uma solução de impermeabilização. Assim, sobre os painéis OSB é aplicada uma barreira pára-vapor, seguindo-se o isolante térmico (placas de poliestireno expandido extrudido) e por fim, a solução de impermeabilização, geralmente em tela em PVC com fixação mecânica e vulcanização (2Mil Aço, 2003).

Na **cobertura inclinada**, a estrutura principal é realizada através de asnas, sobre as quais se realiza o revestimento estrutural. A impermeabilização da cobertura pode ser realizada através de telha asfáltica, cerâmica, P.V.C., metálica, entre outros. No caso da aplicação da telha cerâmica, a impermeabilização deve ser reforçada através da aplicação de uma subtelha. O tecto é suspenso e realizado por painéis de gesso cartonado, sobre os quais assenta a solução de isolamento térmico, geralmente em lã mineral.

5.2.2.2. Processo construtivo

1) Fundações

As fundações deste sistema são realizadas através de processos de construção convencionais, sendo geralmente em betão armado. As fundações são materializadas através de vigas de fundação, que acompanham a base das paredes de carga do edifício (fig. 5.23). Também se pode optar por uma solução de ensoleiramento geral.

Como o peso desta solução construtiva é substancialmente inferior ao da solução construtiva convencional, os trabalhos de fundação são muito mais ligeiros.

Caso exista cave enterrada, os muros de suporte de terras serão em betão armado (fig. 5.24).

Figura 5.23 – Aspecto dos trabalhos de fundação (fonte:Futureng, 2003)

Figura 5.24 – Cave enterrada com muros de suporte em betão armado (fonte: Futureng, 2003)

2) Estrutura

Depois de concluídos os trabalhos de fundação, inicia-se a construção da estrutura. A estrutura de um edifício construído com o sistema LGSF é constituída por uma série de elementos pré-fabricados. No entanto, não se trata duma estrutura pré-fabricada, isto é, da mesma maneira que um edifício convencional é construído com blocos de alvenaria transportados da fábrica para a obra, também neste caso os perfis são transportados para a obra, onde posteriormente são cortados e montados.

As paredes são o elemento de suporte vertical. Para evitar a degradação dos materiais pela humidade ascensional do terreno, deve-se interpor entre as fundações e as paredes uma tela betuminosa de impermeabilização.

De seguida procede-se à ligação dos vários elementos que compõem a estrutura de parede (painelização). A painelização é realizada na horizontal, numa bancada de montagem (fig. 5.25). Posteriormente, os painéis são colocados no local final em obra, sendo fixados aos elementos de fundação através de buchas de ancoragem (fig. 5.26).

Depois de concluídas as paredes de um piso, procede-se à montagem da estrutura da laje do piso superior. As lajes de piso são constituídas por perfis C, de dimensões superiores à dos perfis das paredes, montando-se viga a viga quando o comprimento dos vãos é elevado. Sempre que os vãos forem curtos, pode-se recorrer à técnica de painelização das paredes (fig. 5.27).

Figura 5.25 – Assemblagem dos elementos construtivos (fonte: 2Mil Aço, 2003)

Figura 5.26 – Colocação da estrutura das paredes (fonte: 2Mil Aço, 2003)

Figura 5.27 – Montagem da estrutura da laje (fonte: 2Mil Aço, 2003)

Por fim, realiza-se a estrutura da cobertura. Esta estrutura é também totalmente metálica, constituída por vigas e/ou asnas. As asnas são montadas na horizontal em fábrica ou no estaleiro. De seguida, são colocadas em obra com o espaçamento definido no projecto. A figura 5.28 ilustra a sequência de construção de uma cobertura LGSF em asnas.

Com esta técnica construtiva podem-se criar coberturas com as mais diversas formas, e atendendo ao seu baixo peso, podem-se construir coberturas de elevado vão (fig. 5.29).

a)

b)

Figura 5.28 – Sequência de montagem da estrutura da cobertura: a) Montagem da estrutura da cobertura (asna), na horizontal; b) Colocação das asnas em obra (fonte: 2Mil Aço, 2003)

Figura 5.29 – Exemplo de cobertura LSF (fonte: 2Mil Aço, 2003)

3) Revestimento

3.1) Revestimento estrutural

Depois de concluída toda a estrutura metálica do edifício procede-se ao revestimento da mesma, para que haja maior interligação entre as muitas peças metálicas que a constituem. A ligação entre peças somente na extremidade não é suficiente para estas funcionem em conjunto. Assim, é necessária a colocação de um revestimento que solidarize o conjunto, formando assim uma "pele" ou diafragma, horizontal ou vertical, que permite uma melhor distribuição das acções a que o edifício está sujeito.

O revestimento estrutural mais utilizado é, como já se referiu, constituído por painéis OSB, podendo-se também utilizar painéis de aglomerado de fibras de madeira e cimento. O revestimento estrutural, para além de ser determinante na distribuição das acções pelos diversos elementos da estrutura, serve ainda de suporte aos materiais de isolamento sonoro, acústico e de

acabamento exterior. A figura 5.30 ilustra os elementos estruturais das paredes, lajes de piso e cobertura a serem revestidos.

a)

b)

c)

Figura 5.30 – Aplicação do revestimento estrutural: a) paredes exteriores; b) lajes de piso; c) cobertura (fonte: 2Mil Aço, 2003)

3.2) Revestimento exterior

Em primeiro lugar, de modo a evitar a degradação dos materiais pela acção da água da chuva, realiza-se o revestimento de impermeabilização da cobertura, tal como referido anteriormente.

O primeiro passo no revestimento exterior das paredes consiste em fixar as placas de poliestireno expandido (EPS) ao revestimento estrutural. Sobre o revestimento térmico aplica-se o reboco armado com rede de fibra de vidro.

O aspecto final exterior de um edifício em sistema LGSF é semelhante ao do sistema construtivo convencional (fig. 5.31).

Figura 5.31 – Exemplo de aspecto final de edifício em sistema construtivo LGSF

3.3) Revestimento interior

O revestimento do paramento interior das paredes exteriores e o revestimento das paredes interiores é realizado através de painéis de gesso cartonado. Geralmente, no revestimento do paramento interior das paredes exteriores sobrepõem-se pelo menos duas camadas de painéis, enquanto que no revestimento das paredes interiores utiliza-se apenas uma camada.

Antes da colocação dos painéis de gesso cartonado, procede-se ao preenchimento da cavidade, entre os dois paramentos, com lã mineral. Os painéis de gesso são fixados por aparafusamento à estrutura do edifício. As juntas entre painéis e o local dos parafusos são devidamente tratados para que não se notem essas descontinuidades. Os paramentos interiores ficam assim preparados para receberem qualquer tipo de revestimento final (pintura, colocação de azulejos, colocação de papel, etc.).

5.2.2.3. Comportamento estrutural

O aço é dos materiais de construção que apresenta melhor relação resistência/peso. Deste modo conseguem-se construir edifícios com elementos estruturais mais esbeltos e, por conseguinte, de menor massa. Esta solução permite ainda, devido à sua leveza e resistência, realizar lajes de grande vão. Por outro lado, a massa total de um edifício deste tipo é menor quando comparada com um edifício convencional de igual geometria, o que alivia a carga exercida sobre as fundações. Ao nível do comportamento sísmico, o facto da estrutura ser mais leve e dúctil, diminui significativamente o risco de ruptura da mesma. Recorrendo exclusivamente aos perfis de chapa de aço galvanizado, é possível realizar edifícios de paredes resistentes com 2 a 3 pisos. Se se pretender utilizar esta tecnologia em edifícios de maior altura ter-se-á de introduzir uma estrutura principal em perfis de aço laminado ou betão armado.

5.2.2.4. Comportamento térmico

Ao nível do **isolamento térmico**, o quadro 5.2, apresenta os resultados de um estudo elaborado pelo Laboratório de Física e Tecnologia das Construções da Universidade do Minho, onde se compara, ao nível Coeficiente de Transmissão Térmica, os elementos construtivos de um edifício

com sistema LGSF, com os elementos de construção de um edifício convencional (Almeida *et al*, 2002).

Quadro 5.2 – Comparação dos Coeficientes de Transmissão Térmica (U) (fonte: Almeida *et al*, 2002)

	Coeficiente de Transmissão Térmica (U) ($W/m^2.K$)	
Elemento Construtivo	**Solução LGSF**	**Solução convencional**
Paredes exteriores	0.20	0.85
Cobertura	0.65	0.90
Pavimento	0.90	1.00

De seguida, apresentam-se as características construtivas das soluções construtivas que serviram de base a este estudo:

- As **paredes exteriores** da solução LGSF apresentam, do exterior para o interior, uma camada de reboco de argamassa de cimento, sobre isolamento contínuo em placas de EPS com 5cm, suportadas por painéis OSB, seguindo-se uma manta de lã mineral com 25cm de espessura e, por fim, o revestimento interior, constituído por duas camadas de painéis de gesso cartonado. A solução convencional apresenta parede dupla de alvenaria de tijolo, com pano exterior de 15cm e interior de 11cm, com caixa-de-ar parcialmente preenchida com manta lã mineral com 2cm de espessura.

- Na **cobertura** da solução LGSF é utilizada uma laje plana de cofragem colaborante com uma camada de betão armado de 6cm. Sobre o elemento de suporte é colocada uma camada de 5cm de XPS (poliestireno expandido extrudido) em placas e duas telas asfálticas, com revestimento exterior protector. O tecto é falso em painéis de gesso cartonado com 13cm de espessura. Na solução convencional, a cobertura é constituída por laje de esteira e laje inclinada, ambas constituídas por vigotas pré-esforçadas e blocos de cofragem cerâmicos, com espessura total de 25cm. O desvão não é ventilado. O isolamento térmico da cobertura é conseguido através da aplicação de mantas de lã mineral com 4cm de espessura sobre a laje de esteira e a impermeabilização do conjunto é garantida pelo revestimento da laje inclinada com telhas cerâmicas.

- O **pavimento** da solução LGSF é formado por uma laje de betão com 12cm de espessura, construída através da aplicação de cofragem colaborante (cofragem metálica perdida) assente sobre perfis de chapa galvanizada. O acabamento do piso é realizado por placas rectangulares de madeira laminada colada, afastadas 10 cm da

laje de piso. As lajes da solução convencional são aligeiradas, constituídas por vigotas pré-esforçadas e blocos de cofragem cerâmicos, com espessura total de 25cm.

Como se pode verificar pela análise do quadro 5.2 todos os elementos construtivos da solução LGSF apresentam isolamento térmico superior ao dos elementos da solução convencional.

Em contrapartida, a massa por unidade de superfície dos elementos construtivos da solução LGSF, principalmente das paredes, é bastante menor, pelo que, os edifícios que empregam esta tecnologia apresentam **inércia térmica** inferior ao dos edifícios convencionais (Almeida *et al*, 2002). Esta situação pode comprometer o comportamento térmico desta solução, ao não ser que a massa do(s) pavimento(s) seja suficiente para o armazenamento térmico.

5.2.2.5. Isolamento sonoro

Apesar da baixa massa dos elementos construtivos, a aplicação de grandes espessuras de material absorvente como a lã mineral, torna o isolamento sonoro no sistema LGSF superior ao da solução convencional (Bragança[1] *et al*, 2002).

5.2.2.6. Resistência ao fogo

O facto dos elementos estruturais estarem protegidos por materiais de baixa condutibilidade térmica, como o gesso e a lã mineral, torna a solução construtiva LGSF bastante resistente ou fogo. Estudos demonstram que o tempo de resistência ao fogo duma estrutura deste tipo, calculado com base no EC3, é cerca de 60 minutos, o que é substancialmente superior à resistência de uma estrutura em betão armado não protegida, cuja resistência não ultrapassa os 9 minutos (Gervásio *et al*, 2002)

5.2.2.7. Sustentabilidade ambiental

A menor **massa** dos elementos construtivos deste sistema implica que a massa total de um edifício LGSF seja bastante inferior à de um edifício em sistema construtivo convencional. Estudos demonstram que, em média, a massa de um edifício em sistema LGSF é apenas cerca de 40% da massa de um edifício em sistema convencional com a mesma geometria (Bragança[2] *et al*, 2002). Assim, este sistema construtivo é mais sustentável sob o ponto de vista da preservação dos recursos naturais.

Ao nível da quantidade de **Energia Primária** total incorporada num edifício LGSF, esta é aproximadamente igual à quantidade de energia incorporada num edifício convencional, apesar da menor massa do sistema LGSF (Bragança[2] *et al*, 2002). Esta situação deriva do facto deste sistema utilizar grande quantidade de aço, material que necessita de uma elevada quantidade de energia para ser manufacturado. No entanto, sabendo que uma estrutura de aço apresenta maior possibilidade de ser reutilizada ou reciclada do que uma estrutura em betão armado, conclui-se que o consumo energético, que se verificou durante a sua extracção e fabrico, poderá ser amortizado num maior período de tempo. Por outro lado, a menor massa dos elementos construtivos LGSF, permite a utilização de meios de transporte e equipamentos de estaleiro mais

ligeiros, o que potencia a diminuição do consumo energético nas operações de transporte, elevação e montagem.

Este tipo de sistema é caracterizado por uma forte industrialização do processo construtivo, sendo grande parte dos seus elementos fabricados em fábrica, onde os processos produtivos extremamente controlados permitem a redução dos **resíduos**. Os elementos são produzidos com as dimensões estritamente necessárias à sua futura função, não havendo lugar à produção de resíduos. Por outro lado, as instalações podem ser facilmente introduzidas no interior das paredes antes de se realizar o seu revestimento, evitando-se assim a produção de resíduos que ocorre na construção convencional, aquando da abertura de roços para a implantação das instalações. Também durante a fase de desmantelamento/demolição a produção de resíduos é menor, pois os materiais de construção estão unidos pontualmente, sendo fácil a sua separação para posterior reaproveitamento. O aço é 100% reciclável.

O facto de se prescindir praticamente de trabalhos de cofragem, para além de diminuir o período de construção, previne o desperdício de recursos materiais – devido ao número limitado de utilizações permitidas pelos moldes – e dos recursos energéticos associados às operações de montagem, desmontagem, limpeza e arrumação dos mesmos. Não sendo necessárias grandes quantidades de trabalhos de cofragem é evitada a utilização indiscriminada de óleo descofrante, que durante os processos de limpeza dos moldes é libertado para o ambiente, com efeitos extremamente perniciosos.

5.2.2.8. Construtibilidade, disponibilidade e custo

Esta tecnologia construtiva é recente em Portugal, pelo que ainda há carência de mão-de-obra (empreiteiros, engenheiros, arquitectos, promotores e operários) familiarizada com esta solução, o torna a sua construtibilidade bastante reduzida.

Associado ao facto referido anteriormente, Portugal é um país que importa praticamente todo o aço que consume, o que, aliado à abundância da matéria-prima necessária ao sistema convencional, torna esta solução menos competitiva em temos de custo de construção (Bragança[2], *et al*, 2002). Se a este sistema estiver associado uma maior durabilidade das construções e menores custos de manutenção/reabilitação pode ser que numa análise global de custos, esta solução seja mais vantajosa. No entanto, tendo em conta que este sistema construtivo só agora começa a surgir em Portugal, não existem dados quanto ao seu comportamento a longo prazo. Outro aspecto que não pode ser esquecido, é que o valor venal dos edifícios construídos com este sistema é superior, tendo em conta a elevada potencialidade dos seus componentes virem a ser reutilizados ou reciclados.

O maior custo de construção pode ainda ser compensado pela menor quantidade de energia necessária à manutenção das condições de conforto interior, devido ao elevado isolamento térmico dos elementos da envolvente.

5.2.3. Vantagens e inconvenientes

No quadro 5.3 são apresentadas as principais vantagens e inconvenientes dos sistemas construtivos LGSF, relativamente ao sistema construtivo convencional.

Quadro 5.3 – Principais vantagens e inconvenientes dos sistemas construtivo LGSF

Vantagens	Inconvenientes
• Menor peso de construção, o que potencia a utilização deste sistema em edifícios com grande altura ou em obras de ampliação; • Superior isolamento térmico e acústico dos elementos da envolvente; • Menor quantidade de trabalhos de fundação; • Processo de construção mais industrializado (menor tempo de construção, menor dependência em relação ao clima, menor produção de resíduos); • Comportamento sísmico; • Maior resistência ao fogo; • Maior facilidade na realização das instalações; • Permite a utilização de meios de transporte e equipamentos mais ligeiros, nas operações de transporte, construção e desmantelamento, o que implica menor consumo energético nestas operações; • A ligação mecânica entre os elementos construtivos facilita o desmantelamento do edifício e aumenta as potencialidades de reutilização e reciclagem dos materiais utilizados; • Elementos estruturais 100% recicláveis; • Maior valor venal do edifício.	• Fraca inércia térmica (em climas com grandes amplitudes térmicas) • Falta de mão-de-obra especializada; • Custo geralmente mais elevado; • Não existem dados quanto ao seu comportamento a longo prazo.

5.3. Sistemas construtivos em betão celular autoclavado

5.3.1. Introdução

O betão celular autoclavado (ACC[1]) foi descoberto em 1914 pelo arquitecto sueco Johann Axel Erikson, tendo sido patenteado em 1924 (Bentil, 2001). É um produto leve, formado a partir de uma reacção química entre cal gorda, cimento "Portland" normal, areia siliciosa, água e pó de alumínio que, após uma cura numa câmara de vapor de alta pressão (autoclave), dá origem a um silicato de cálcio, composto químico estável. O ACC é um produto inorgânico que, apesar de ser de baixo peso, apresenta boa capacidade mecânica, para além de ser um razoável isolante térmico e acústico e apresentar elevada resistência ao fogo e aos microorganismos (PATH, 2001).

Em Portugal, a utilização deste material é muito reduzida, estando praticamente limitada à realização de alvenarias não estruturais. No entanto, para além da sua utilização em blocos para alvenarias, com as mais diversas dimensões, este material pode ser utilizado na realização de elementos construtivos pré-fabricados das mais diversas formas e dimensões como, por exemplo, painéis armados ou para lajes, paredes e coberturas; caixas-de-estore e outros elementos especiais.

Este produto tem sido caracterizado como sendo o único que, só por si, consegue praticamente satisfazer todas as exigências funcionais dos elementos construtivos, permitindo ainda grande flexibilidade de desenho e prazos de construção reduzidos. Revela-se ainda uma tecnologia compatível com o ambiente, pois necessita de pouca quantidade de matéria-prima, poucos recursos energéticos na sua produção e na fase construção, está associada à produção de pouca quantidade de resíduos e apresenta ainda elevado potencial de reciclagem (Bukoski, 1998).

5.3.2. Resumo das suas características técnico-funcionais

5.3.2.1. Sistemas construtivos

Os fabricantes de sistemas construtivos ACC disponibilizam uma gama variada de produtos, existindo no mercado sistemas mais ou menos completos. Esta situação é natural, pois as vantagens a nível estrutural e a nível do comportamento térmico tornam esta tecnologia adequada para a construção de paredes, lajes e coberturas.

---

[1] Do Inglês: "Autoclaved Cellular Concrete". Também conhecido por "Autoclaved Aerated Concrete" – AAC.

Muitos dos sistemas existentes vão muito para além dos blocos e painéis, utilizados na construção de paredes, lajes e coberturas – incluindo também outros elementos específicos e produtos de ligação. Um sistema ACC completo pode incluir, entre outros (PATH, 2001):

- Blocos de dimensões *standard*;
- Blocos de grandes dimensões;
- Lintéis ou blocos em forma de U;
- Painéis de parede;
- Painéis de laje;
- Painéis de cobertura;
- Degraus;
- Elementos ornamentais;
- Rebocos;
- Argamassas de assentamento pré-doseadas;
- Dispositivos de ligação;
- Acessórios;
- Ferramentas;
- Equipamento;
- Forras para a correcção de pontes térmicas;

As figuras 5.32 e 5.33 apresentam alguns exemplos de componentes básicos disponíveis no mercado. As diferenças existentes de fabricante para fabricante são muito reduzidas.

Figura 5.32 – Componentes e equipamento de sistema construtivo ACC (fonte: CURRAN, 2003)

Neste sistema as paredes são geralmente de carga, podendo-se, no entanto, sempre que necessário recorrer a uma estrutura resistente porticada em betão armado, aço ou madeira (fig. 5.34 e 5.35). A utilização de pórticos torna-se necessária por diversas razões estruturais. A resistência aos sismos dos edifícios em ACC com diversos pisos de altura, pode obrigar ao seu reforço através da introdução de pórticos que absorvam as elevadas cargas horizontais. A compatibilização das paredes ACC com uma estrutura de aço ou de madeira é simples.

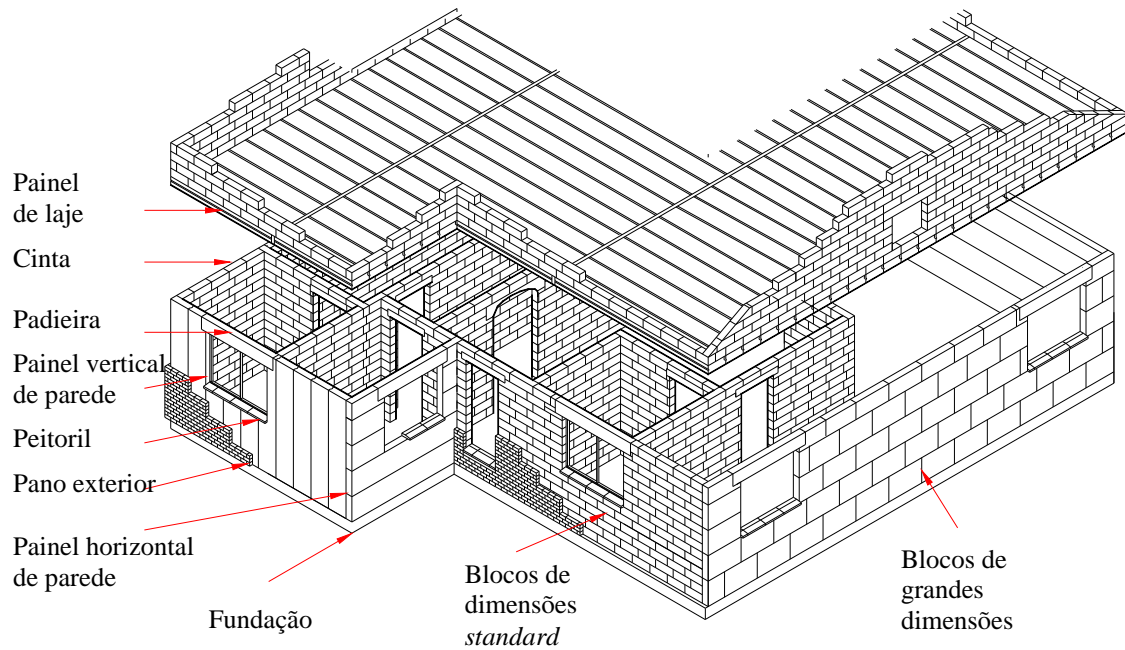



Figura 5.33 – Componentes de sistema construtivo ACC (fonte: Babb International, Inc.)

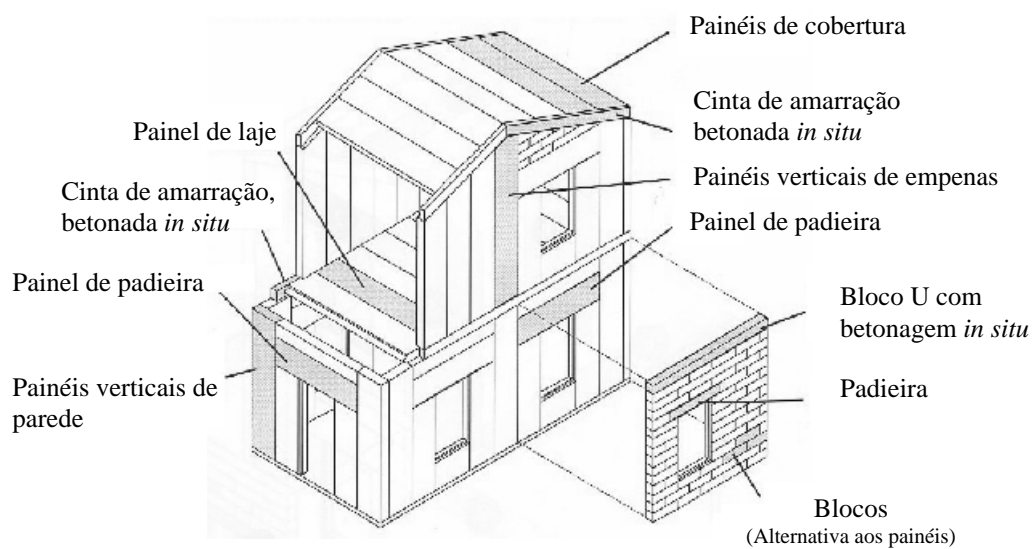



Figura 5.34 – Componentes de sistema construtivo ACC com paredes resistentes
(fonte: ACCOA, 2003)

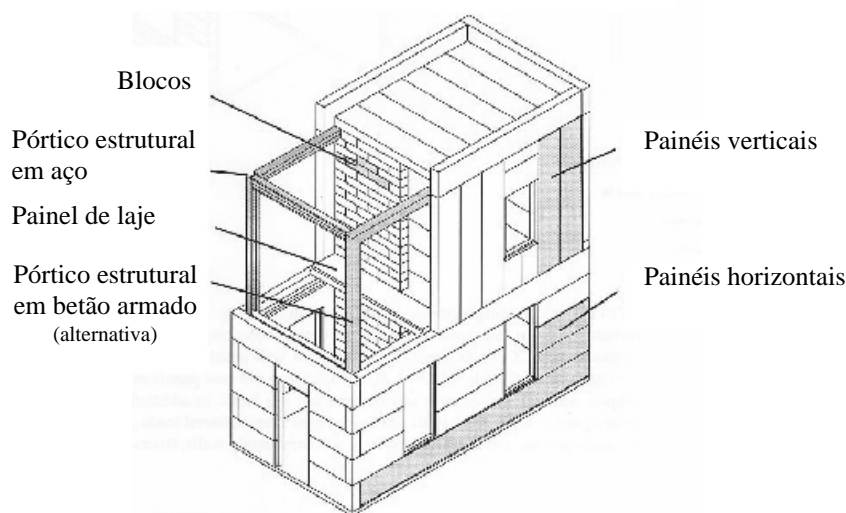



Figura 5.35 – Componentes de sistema construtivo ACC sem paredes resistentes
(fonte: ACCOA, 2003)

5.3.2.2. Processo construtivo

O processo construtivo do sistema ACC é simples. Os fabricantes deste sistema disponibilizam uma grande quantidade de informação técnica de apoio à concepção e construção, o que em princípio assegura o seu sucesso.

Na solução com paredes resistentes, o ACC encontra-se disponível em blocos de diferentes tamanhos e em painéis armados de grandes dimensões. Estes elementos são vendidos como partes de um sistema construtivo completo que inclui painéis para lajes e cobertura, como complemento às paredes exteriores e interiores. Nesta solução, as fundações são geralmente realizadas por lintéis, podendo-se também optar pelo ensoleiramento geral.

A construção das paredes de blocos é semelhante à construção convencional de paredes resistentes, constituídas por unidades de alvenaria (fig. 5.36). A primeira fiada de blocos é assente nas fundações e nivelada utilizando-se uma argamassa convencional. As fiadas subsequentes assentam-se utilizando uma argamassa especial fornecida pelo fabricante do sistema construtivo (PATH, 2001). Os cunhais e pequenas aberturas podem ser realizados com elementos específicos ou cortando os blocos *standard* com as dimensões e forma pretendidas. A natureza mole deste material permite que seja facilmente trabalhado com ferramentas de corte manuais. As cintas de amarração são realizadas em blocos em forma de U e as padieiras são realizadas em elementos pré-fabricados.

Os painéis de laje assentam sobre as paredes resistentes e a sua ligação é assegurada por lintéis em betão armado, betonados *in situ*. Devido ao seu baixo peso, os blocos e os painéis ACC são elevados e assentes utilizando-se uma grua ou auto-grua ligeira (fig. 5.37).

Na solução sem paredes resistentes, os painéis de parede, laje e cobertura são fixados à estrutura resistente de betão armado ou aço através de dispositivos de ligação.

Figura 5.36 – Assentamento dos blocos ACC (fonte: CURRAN, 2003)

Figura 5.37 – Colocação de Painéis de piso/ cobertura ACC (fonte: CURRAN, 2003)

As instalações são facilmente embutidas nas paredes, pois os roços são facilmente executados manualmente ou através de equipamento eléctrico. No entanto, atendendo à elevada quantidade de pó produzida, deverão ser acauteladas estratégias para a redução de pó, e os trabalhadores devem utilizar máscaras durante toda a operação (AGO, 2003).

Para revestimentos exteriores, o ACC apresenta uma superfície preparada para receber o tradicional reboco de argamassa de cimento e areia. No entanto, os fabricantes recomendam a utilização de argamassas pré-doseadas específicas. O reboco utilizado deve ser permeável ao vapor – mas impermeável à água – de modo a tornar os edifícios saudáveis, e resistente aos raios ultravioletas.

Para revestimento interior utiliza-se vulgarmente o reboco convencional, os rebocos pré-doseados ou painéis de gesso cartonado.

5.3.2.3. Pormenores construtivos

A maior parte dos fabricantes destes sistemas construtivos disponibilizam o necessário apoio técnico, oferecendo-se, na maior parte das vezes, para a realização do projecto. Existe, no entanto, um elevado número de pormenores construtivos básicos, disponíveis nos manuais técnicos editados pelos fabricantes. As figuras 5.38 a 5.42 representam alguns exemplos de pormenores construtivos para os diversos elementos de construção.

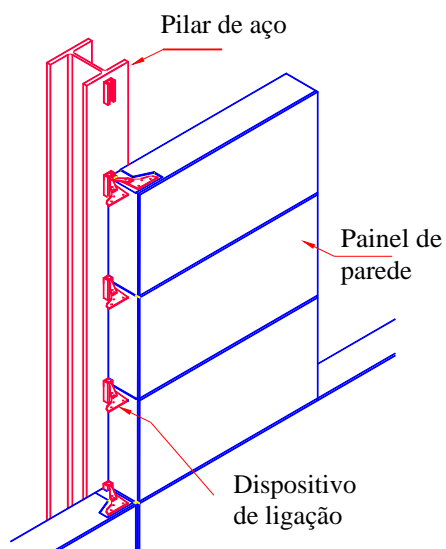



Figura 5.38 – Ligação de painéis horizontais de parede a pilar de aço (fonte: CURRAN, 2003)

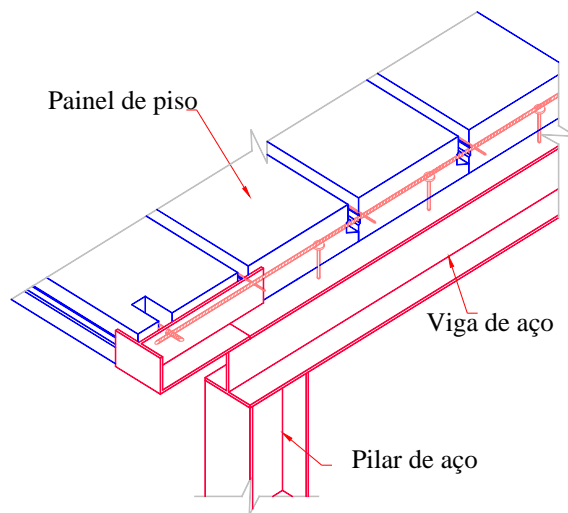



Figura 5.39 – Ligação de painéis de piso/cobertura a viga de aço (fonte: CURRAN, 2003)

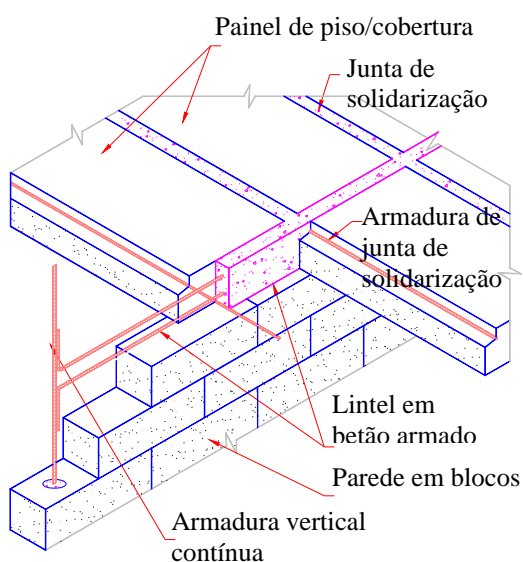



Figura 5.40 – Ligação de painéis de piso a parede resistente de blocos (fonte: CURRAN, 2003)

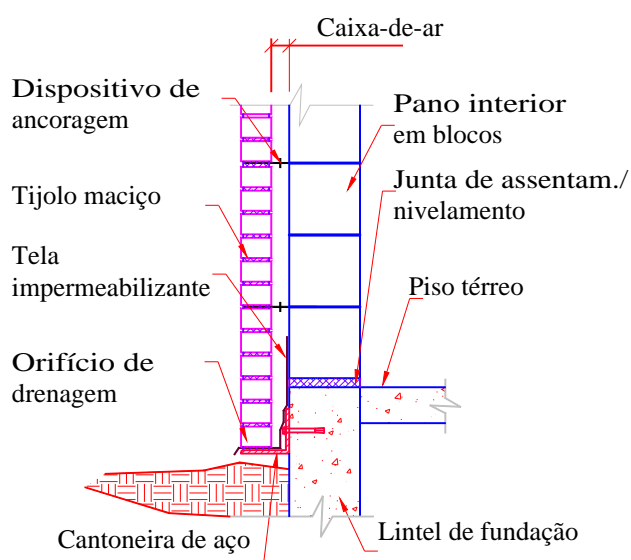



Figura 5.41 – Ligação de parede dupla exterior a lintel de fundação (fonte: CURRAN, 2003)

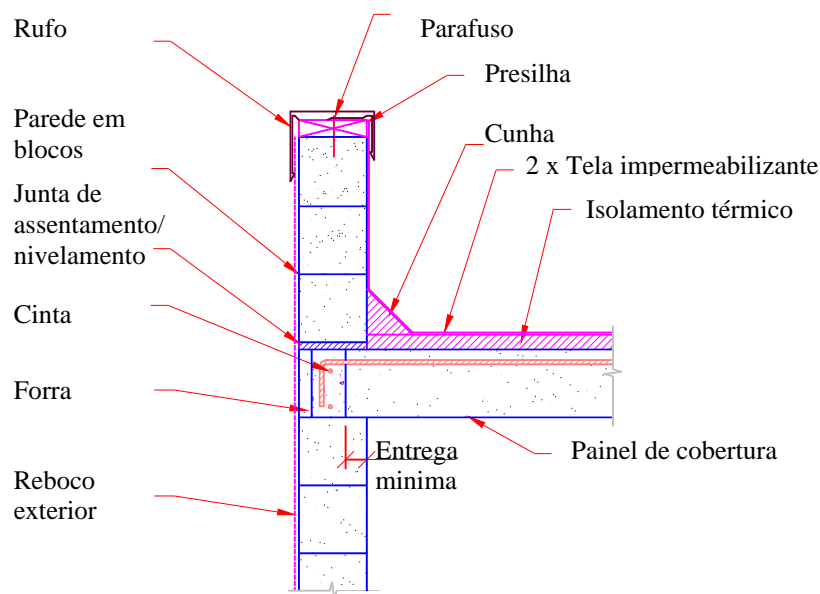



Figura 5.42 – Pormenor de cobertura plana com platibanda (fonte: CURRAN, 2003)

5.3.2.4. Aspecto

Os componentes construtivos ACC apresentam cor esbranquiçada. À vista desarmada, podem-se observar uma série de bolhas de ar. As bolhas contribuem para as propriedades isolantes deste material e para o seu baixo peso. Este material é mole e pode ser facilmente trabalhado com ferramentas para madeira. No entanto, a sua porosidade impede que seja deixado à vista nos paramentos, pelo que é necessário revestir os paramentos exteriores com um acabamento impermeabilizante. Assim, o aspecto dos edifícios construídos com este sistema é semelhante ao dos edifícios convencionais (fig. 5.43 e 5.44).

Figura 5.43 – Moradia em sistema construtivo ACC, em Hilton Head, SC, USA (fonte: AACPA, 2003)

Figura 5.44 – Hospital em sistema construtivo ACC, em Savanah, USA (fonte: AACPA, 2003)

5.3.2.5. Comportamento estrutural

A resistência mecânica à compressão dos componentes ACC, como se pode observar pelo quadro 5.4, é elevada, o que permite a execução em segurança de estruturas de paredes resistentes, até 3 pisos de altura (AGO, 2003). A ligação dos diversos componentes pode ser executada através da betonagem *in situ* das juntas ou através de ligação mecânica, com dispositivos metálicos desenvolvidos para o efeito. O correcto tratamento das juntas é um aspecto fundamental na resistência do conjunto às acções horizontais, para além de influenciar o seu comportamento térmico, acústico e a permeabilidade à água da chuva. Os painéis de paredes e lajes são armados de modo a que resistam os esforços que se desenvolvem nas fases de transporte, construção e serviço (AGO, 2003).

Quadro 5.4 – Propriedades do betão celular autoclavado (fonte: ACCOA, 2003)

Propriedade	Valores característicos
Resistência à compressão	4,00 Mpa
Peso específico	600 a 720 kg/m^3
Módulo de elasticidade - a curto prazo - a longo prazo	 2,00 Gpa 1,33 Gpa
Condutibilidade térmica	0,16 W/m.ºC
Calor específico	1,05 kJ/kg.ºC
Coeficiente de dilatação térmica	8 x 10^{-6}/ºC

5.3.2.6. Comportamento térmico

Os edifícios construídos com esta tecnologia apresentam uma massa substancialmente inferior à dos sistemas construtivos convencionais, pois este produto contém muitos vazios. Deste modo, a inércia térmica é relativamente baixa, o que a par da sua relativamente baixa condutibilidade térmica tornam esta tecnologia adequada a climas com grandes necessidades de aquecimento (ver capítulo III – 3.2.1.3) (AGO, 2003).

Como se pode observar pelo quadro 5.4, a conductibilidade térmica deste material é relativamente baixa, pelo que o isolamento térmico é razoável. A capacidade deste material em controlar a tempertura interior de um edifício foi estudada pelo Instituto Fraunhofer para a Física Arquitectural, situado na Alemanha. No teste são medidas as temperaturas superficiais de uma parede com 250mm de espessura por um período de 24 horas. A parede em estudo encontrava-se orientada a Poente e o seu paramento exterior estava pintado de cor preta, permitindo o aumento da temperatura superficial nessa face. A amplitude térmica na face exterior foi de

aproximadamente 70ºC, enquanto que a temperatura da face interior permaneceu próxima dos 20ºC, havendo apenas uma pequena variação de cerca de 2ºC. A figura 5.45 apresenta os resultados deste teste (PATH, 2001).

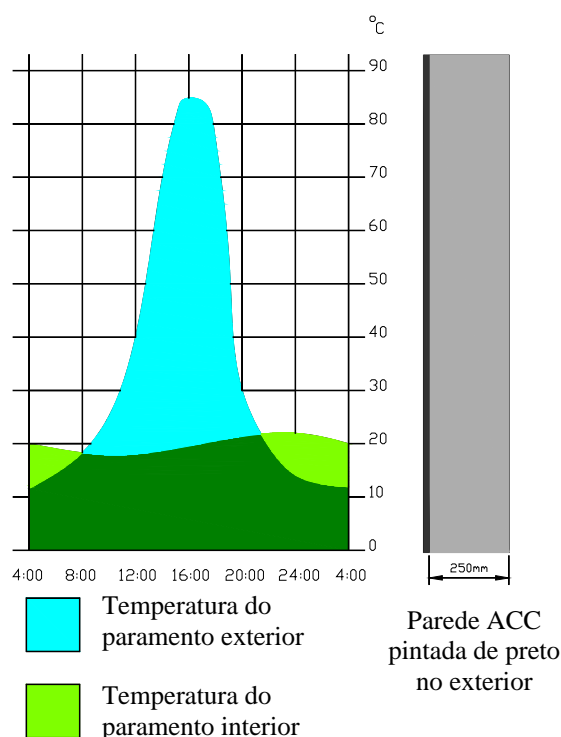



Figura 5.45 – Temperaturas superficiais nos paramentos de uma parede ACC (fonte: PATH, 2001)

Para além da grande vantagem de manter a temperatura interior numa gama de temperturas confortáveis, existe um atraso significativo, de cerca de 8 horas, entre o pico de temperatura exterior e o pico de temperatura interior. Este atraso permite que, se for necessário recorrer a sistemas de arrefecimento (durante a estação de arrefecimento), o consumo energético ocorra durante as horas de vazio, com vantagens quer para os utilizadores como para as companhias eléctricas (PATH, 2001).

5.3.2.7. Isolamento sonoro

A estrutura celular deste material, que é constituído por cerca 60 a 70% de ar, em conjunto com uma razoável massa por unidade de superfície, tornam-no num bom isolante sonoro (AGO, 2003 e ACCOA, 2003). Tal como noutros sistemas pré-fabricados é necessário prestar muita atenção às juntas pois, se não forem devidamente executadas, podem comprometer o isolamento sonoro do conjunto.

5.3.2.8. Resistência ao fogo e aos microorganismos

O ACC é um produto que apresenta boas características ao nível da resistência ao fogo, destacando-se (ACCOA, 2003):

- É um material inorgânico e incombustível;
- Não são emitidos gases tóxicos quando exposto ao fogo e/ou a altas temperaturas;
- A sua baixa condutibilidade retarda a transmissão do fogo para outros compartimentos e, no caso de sistemas construtivos com estrutura porticada de aço e betão, protege os elementos estruturais das altas temperaturas;
- O baixo coeficiente de dilatação térmica (quadro 5.4) torna a sua estrutura estável quando sujeito a altas temperaturas.

Não estão criadas as necessárias condições para que os microorganismos e insectos habitem e se alimentem deste material. Sem preocupações no que respeita à degradação da sua estrutura pelos microorganismos ou insectos, tal como acontece, por exemplo, na madeira, evita-se a utilização de produtos químicos com efeitos bastante perniciosos para a saúde e meio ambiente (PATH, 2001).

5.3.2.9. Durabilidade e resistência à humidade

A propositada baixa densidade deste material torna-o frágil, o que causa a sua degradação quando sujeito a impactos. Com as superfícies devidamente tratadas, de modo a resistirem à penetração da humidade, este material não é afectado por condições climáticas severas e não se degrada quando sujeito a condições atmosféricas normais (AGO, 2003).

A natureza porosa deste material implica que este absorva humidade, pelo que se tem de dar especial atenção à atempada manutenção do acabamento das superfícies. A absorção de humidade não coloca em risco a estabilidade estrutural deste sistema, degradando apenas o seu isolamento térmico. Existe um elevado número de acabamentos específicos para este material, normalmente poliméricos, que constituem uma adequada e durável protecção contra a humidade (AGO, 2003).

5.3.2.10. Toxidade

A natureza porosa deste material torna-o permeável ao ar, o que contribui para a qualidade do ar do ambiente interior (AGO, 2003).

Depois de concluída a construção de um edifício em sistema construtivo ACC, não são emitidos para o ambiente quaisquer poluentes ou produtos tóxicos que afectem a qualidade do ar interior (PATH, 2001). No entanto, na fase de construção, é produzida uma elevada quantidade de partículas cimentícias finas (poeiras) durante as operações de corte e abertura de roços, pelo que se aconselha a utilização de máscaras e/ou técnicas de corte húmidas.

5.3.2.11. Sustentabilidade Ambiental

Ao nível do impacte ambiental, se se analisar a energia incorporada neste produto (PEC) e as emissões de GEE's que resultam da sua produção, verifica-se que por unidade de peso estas características são semelhantes às do betão. No entanto, como o peso por unidade de volume é neste produto cerca de 1/4 a 1/5 do peso do betão (ver quadro 5.4), o ACC apresenta vantagens neste domínio (AGO, 2003).

Por outro lado, o razoável isolamento térmico deste material reduz a necessidade de se recorrer a meios mecânicos de acondicionamento da temperatura interior, o que para além de constituir uma vantagem económica é também uma vantagem ambiental.

Devido ao seu baixo peso por unidade de volume, a quantidade de matéria-prima necessária a este sistema construtivo é baixa quando comparada com os sistemas convencionais, contribuindo assim, para a preservação dos recursos naturais. O seu baixo peso potencia ainda a utilização de meios de transporte e elevação mais ligeiros, pelo que o consumo energético nestas operações pode ser reduzido.

O elevado grau de industrialização associado a esta tecnologia, traduz-se na produção de menor quantidade de resíduos e melhores condições de trabalho para os intervenientes durante fase de construção.

5.3.2.12. Construtibilidade, disponibilidade e custo

Os produtos ACC pesam, como já foi referido, cerca de 1/5 dos produtos em betão armado com o mesmo volume, e são produzidos com uma grande gama de formas e dimensões, sendo facilmente trabalhados com as ferramentas correntes. Por outro lado, o elevado número de pormenores tipo existentes e o apoio técnico disponibilizado pelos produtores asseguram a sua construtibilidade, potenciando a diminuição das alterações/adaptações que ocorrem vulgarmente na construção convencional – devidas ao baixo grau de pormenorização dos projectos.

Em contrapartida, devido ao facto de nesta tecnologia construtiva a maior parte dos elementos construtivos serem prefabricados, as tolerâncias dimensionais em obras são bastante menores, pelo que, será essencial o recurso a mão-de-obra qualificada e a uma fiscalização eficiente (AGO, 2003).

Existem em Portugal alguns fornecedores deste tipo de produtos. No entanto, a sua utilização é bastante reduzida e resume-se praticamente à utilização de blocos ACC em alvenarias não resistentes. Existem raros exemplos de edifícios, principalmente industriais, onde se utilizaram painéis de fachada e de laje. O baixo número de exemplos construídos constitui um entrave à disseminação desta tecnologia.

Ao nível do custo de construção, o baixo número de fornecedores, a sua concentração apenas nas cidades mais importantes – com implicações ao nível dos custos de transporte –, o baixo número de empresas com a adequada preparação para lidarem com esta tecnologia, são factores que apontam para a baixa competitividade desta solução.

No entanto, os produtores insistem que esta tecnologia é mais competitiva do que a convencional por permitir menores custos de mão-de-obra – devido ao maior rendimento na construção –, menores custos com equipamento – devido ao seu baixo peso –, e soluções de isolamento térmico mais económicas – devido à baixa condutibilidade térmica deste material. O quadro 5.5 apresenta a comparação dos custos relacionados com a construção de uma parede não estrutural em blocos ACC (de 200mm de espessura) com uma em blocos de betão (140mm de espessura + 70mm de lã de vidro).

Quadro 5.5 – Comparação de custos entre parede de blocos ACC e parede de blocos de betão (fonte: YTONG - Portugal, 2003)

Componente	Bloco ACC 200mm	Blocos de betão 140mm + 70mm de lã de vidro
Custo de mão-de-obra	31%	69%
Custo de material	63%	34%
Custos de aluguer de equipamento	6%	5%
Custo total	**100%**	**108%**

Para além dos custos económicos, não se podem ignorar os custos ambientais que, como já se referiu anteriormente, são nesta tecnologia menores.

5.3.3. Vantagens e inconvenientes

No quadro 5.6 são apresentadas as principais vantagens e inconvenientes dos sistemas construtivos ACC, relativamente ao sistema convencional.

Quadro 5.6 – Principais vantagens e inconvenientes dos sistemas construtivos ACC (fonte: Bentil, 2001 e AGO, 2003)

Vantagens	Inconvenientes
• Menor peso de construção, o que potencia a utilização deste sistema em edifícios com grande altura ou em obras de ampliação; • Maior isolamento térmico dos elementos da envolvente; • Menor quantidade de trabalhos de fundação; • Processo de construção mais industrializado (menor tempo de construção, menor dependência em relação ao clima, menor produção de resíduos); • Maior resistência ao fogo; • Utilização de meios de transporte e equipamentos mais ligeiros, nas operações de transporte, construção e desmantelamento, o que implica menores custos a este nível; • Versátil, devido ao elevado número de peças com diferentes dimensões e formas.	• Produto recente em Portugal. Falta de mão-de-obra especializada para lidar com esta tecnologia; • Baixo número de fornecedores e os que existem encontram-se no Porto e/ou em Lisboa, pelo que, os custos de transporte para outros locais são elevados; • Menor resistência sísmica (na solução construtiva com paredes resistentes); • Produção de poeiras durante a fase de construção.

CAPÍTULO 6

SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NÃO CONVENCIONAIS PARA PAREDES EXTERIORES

6.1. Parede de Trombe

6.1.1. Introdução

Desde da antiguidade que o Homem recorre a paredes espessas de adobe ou de pedra de modo a armazenar o calor do sol durante o dia, para ser libertado lenta e continuamente durante a noite. A Parede de Trombe é uma tecnologia de paredes exteriores que surgiu no âmbito da arquitectura solar passiva, e que resultou da evolução desse conceito.

Esta solução construtiva foi inventada no final dos anos 50 pelo investigador francês Félix Trombe, sendo hoje uma das soluções construtivas mais utilizadas no projecto solar passivo.

A designação de arquitectura solar passiva refere-se, a um tipo de arquitectura, que dá especial atenção aos aspectos de adaptação da construção ao clima do lugar, sendo essa adaptação conseguida através de meios naturais.

Atendendo à amenidade do clima de Portugal, é possível tornar um edifício confortável sem se recorrer a meios mecânicos que utilizem processos consumidores de energias convencionais. Na concepção de um edifício, não se pode esquecer que o seu conforto deve ser garantido através da adequação do seu desenho ao clima do local, escolha criteriosa dos materiais e da aplicação de sistemas que utilizam processos naturais, minimizando assim a utilização de meios mecânicos que impliquem elevados consumos de energias poluentes. A opção pelo conceito de arquitectura solar passiva apresenta benefícios evidentes, pois os utilizadores dos edifícios para além de usufruírem de um espaço interior confortável, passam a ter acesso ao conforto de uma forma menos dispendiosa e com menor impacte sobre o meio ambiente.

A Parede de Trombe é um sistema de ganhos energéticos indirectos. Nos sistemas de ganhos directos (p. e. janelas), a temperatura interior dos edifícios é totalmente dependente das horas de sol, o que, em conjunto com o incontrolado processo de acumulação de energia nos pavimentos e paredes, pode provocar uma irregular distribuição de calor ao longo do dia. Nos sistemas indirectos, a captação realiza-se através de um elemento que actua como acumulador de calor. O calor é cedido ao interior, a partir deste elemento, por processos de convecção e condução, o que, devido à sua inércia térmica, retarda e amortece a oscilação das temperaturas interiores. A figura 6.1 apresenta dois aspectos exteriores de Paredes de Trombe.

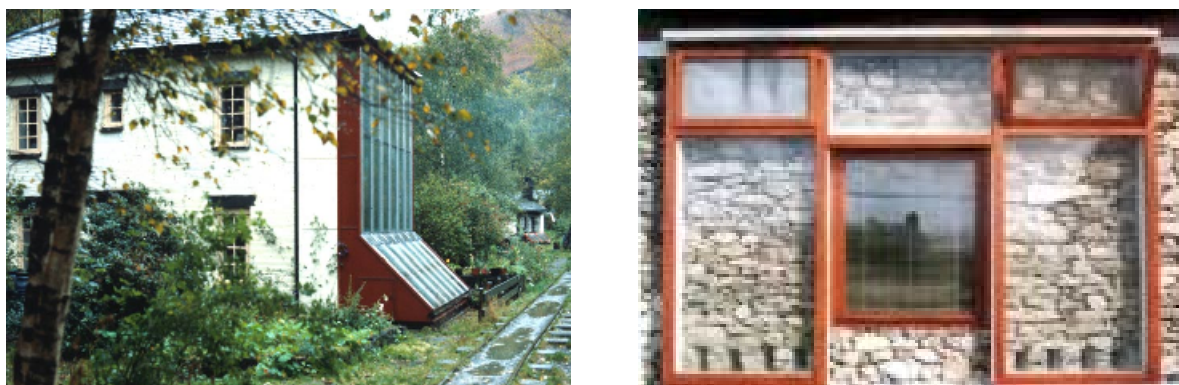



Figura 6.1 – Exemplos de Paredes de Trombe

Este tipo de solução proporciona um elevado conforto térmico, já que as flutuações de temperatura no espaço habitado são reduzidas. É uma solução que contribui para a sustentabilidade da construção na vertente do impacte ambiental.

6.1.2. Resumo das características técnico-funcionais

1) Constituição

A Parede de Trombe é composta essencialmente por um pano simples ou duplo de vidro no exterior, orientado a Sul, uma câmara-de-ar e um elemento confinador.

O elemento confinador é um pano de parede com grande espessura e densidade, geralmente em betão armado, pedra ou adobe, e apresenta o paramento exterior pintado de cor escura. As suas duas funções são a captação e acumulação de energia proveniente da radiação solar. Numa Parede de Trombe corrente, o elemento confinador apresenta uma espessura na gama dos 200 aos 400mm. A espessura do elemento é definida de modo a que o calor não chegue ao espaço interior por condução durante as horas de sol, mas que permita que tal aconteça a partir do momento em que o sol se põe. Numa Parede de Trombe com elemento confinador de 400mm, o calor só chega por condução ao paramento interior passadas 8 a 10 horas após o início do armazenamento de calor (NREL – National Renewable Energy Laboratory, USA).

O vidro é colocado afastado cerca de 20 a 150 mm do elemento confinador de modo a criar uma pequena caixa-de-ar (NREL – National Renewable Energy Laboratory, USA). O calor

proveniente da radiação solar, que atravessa o envidraçado, é absorvido pela superfície escura, armazenado no elemento confinador e conduzido lentamente através deste ao interior. O vidro previne que o calor radiante, emitido a partir da face quente do elemento confinador, escape para o exterior. O calor irradiado pela parede é assim armazenado na caixa-de-ar, promovendo ainda mais o aquecimento da parede.

No elemento confinador podem ser efectuadas aberturas de ventilação, tanto na parte inferior como superior, para permitir a circulação de ar através da caixa-de-ar (fig. 6.2). Assim, a caixa-de-ar é utilizada para a passagem de correntes de ar que aquecerão por convecção o espaço interior mais rapidamente.

Nas aberturas de ventilação, devem-se prever sistemas que possibilitem o controlo do fluxo, permitindo assim controlar as temperaturas interiores, de modo a evitar condições de sobreaquecimento durante o dia e de rápido arrefecimento durante a noite.

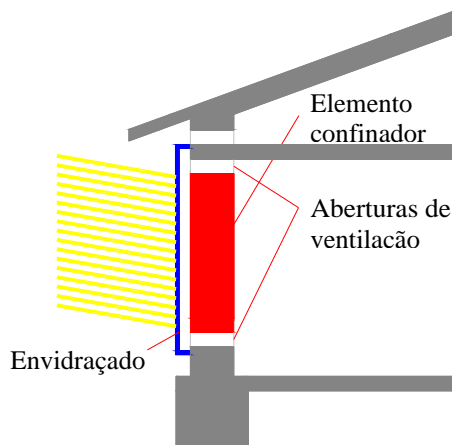



Figura 6.2 – Representação esquemática da Parede de Trombe

2) Aspectos elementares de funcionamento

Numa Parede de Trombe **sem aberturas de ventilação**, a radiação solar incidente no vidro é armazenada no elemento confinador e libertada para o espaço interior por condução e convecção, geralmente após o pôr-do-sol. Assim, o compartimento anexo à parede será confortável durante o dia e assim permanecerá durante a noite, pois o calor armazenado durante o dia no elemento confinador será libertado lenta e continuamente durante algumas horas após o pôr-do-sol, reduzindo expressivamente as necessidades de aquecimento e arrefecimento convencionais.

Na solução **com aberturas de ventilação**, há que distinguir o funcionamento da parede durante o dia, do funcionamento durante a noite.

Durante o dia, a radiação solar incidente no vidro aquece o ar existente na câmara-de-ar. O ar aquecido ascende por convecção natural e atravessando a parede pelos orifícios superiores, passa para o espaço interior. O efeito de termo-sifão que se cria na caixa-de-ar puxa, através das

aberturas inferiores da parede, o ar frio do espaço interior, que se encontra estratificado por temperaturas. Desta forma, cria-se o chamado "caracol convectivo" que faz circular o ar frio do espaço interior para a câmara-de-ar, onde aquece e volta a entrar para o interior (fig. 6.3). Simultaneamente, enquanto recebe a radiação solar, a parede vai acumulando energia que, ao fim de um certo tempo, acaba por atravessar a parede aflorando na face interior, aquecendo a habitação por convecção e transmissão. O "caracol convectivo" é interrompido no momento em que a radiação solar deixa de aquecer o ar no interior da caixa-de-ar.

A partir do momento em que a radiação solar deixa de aquecer o ar existente na caixa-de-ar, as aberturas de ventilação devem ser encerradas, de modo a evitar as perdas de cargas térmicas, que se verificariam devido à inversão do "caracol convectivo". É neste momento que tem importância a inércia térmica da parede. Numa Parede de Trombe bem dimensionada, é a partir deste momento que a parede começa a libertar calor por condução e convecção, aquecendo o espaço interior (fig. 6.4). Assim, dado que a energia começa a atravessar a parede no momento em que esta começa a receber a radiação solar, o número de horas que o calor demora a atravessar a parede deve coincidir com o número de horas de exposição solar da mesma.

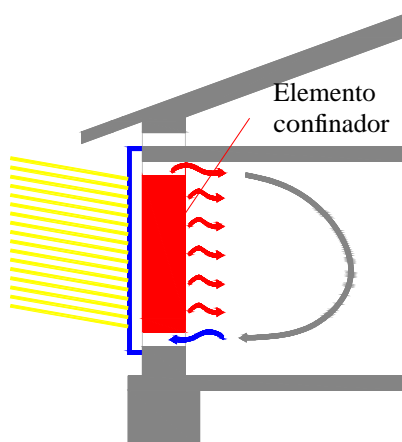



Figura 6.3 – Funcionamento da Parede de Trombe durante o dia (Inverno)

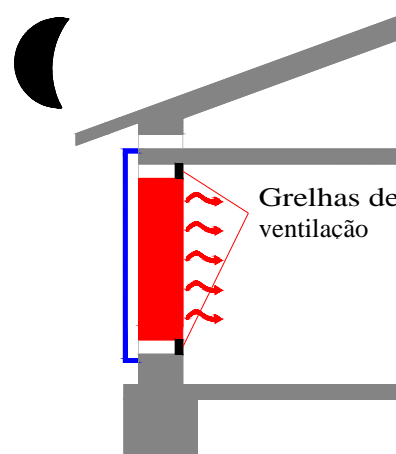



Figura 6.4 – Funcionamento da Parede de Trombe durante a noite (Inverno)

O comportamento da Parede de Trombe pode ainda ser melhorado durante as estações amenas (Primavera/Outono) e de arrefecimento (Verão), através da introdução de sistemas controláveis que permitam a entrada de ar pela base do envidraçado e a saída pelo seu topo. Durante a Primavera e Outono, a temperatura amena do ar exterior potencia a utilização da parede para a ventilação natural do espaço interior, sem perda de cargas térmicas (fig. 6.5).

Durante o Verão, abrindo o topo do envidraçado, é possível evitar o sobreaquecimento do espaço interior. O ar aquecido pela radiação solar na caixa-de-ar ascende e escapa para o exterior, succionando o ar interior através da base da parede (fig. 6.6).

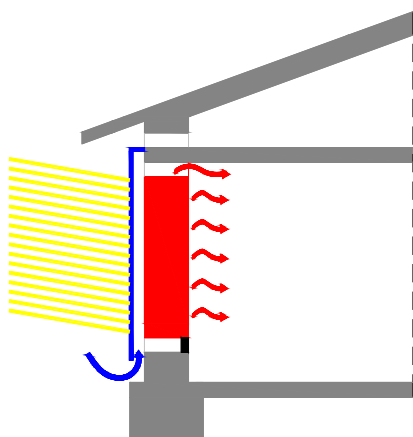



Figura 6.5 – Funcionamento da Parede de Trombe durante as estações amenas (Primavera/Outono)

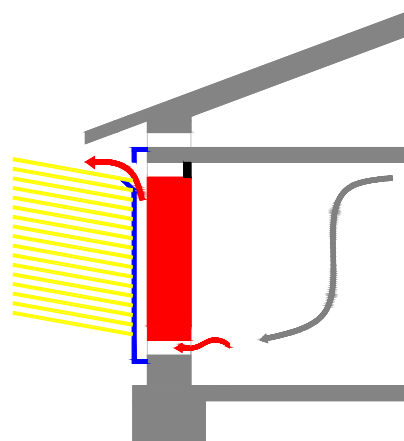



Figura 6.6 – Funcionamento da Parede de Trombe durante a estação de arrefecimento (Verão)

6.1.3. Vantagens e inconvenientes da Parede de Trombe

No quadro 6.1 são apresentadas as principais vantagens e reservas da Parede de Trombe, relativamente aos sistemas de ganhos directos.

Quadro 6.1 – Principais vantagens e inconvenientes da Parede de Trombe

Vantagens	Inconvenientes
• Sistema de aquecimento passivo de baixa manutenção; • Reduz o consumo de energias não renováveis para o aquecimento (vantagens económicas e ambientais); • Protecção contra a degradação ultravioleta e privacidade no compartimento interior; • A flutuação de temperatura no espaço habitado é mais baixa;	• Não permite a iluminação natural; • Formação de condensações no envidraçado (humidificação dos materiais de construção, favorecendo a sua degradação precoce); • Comportamento durante longos períodos de céu nublado. Sem radiação solar, a parede não funciona, sendo necessário recorrer a soluções de aquecimento convencionais. A elevada massa da parede e a ausência de isolamento térmico propiciam a perda de parte do calor produzido no interior, retardando o aquecimento; • Elevada espessura total da parede, o que diminui o espaço útil de construção; • Maior custo de construção (necessidade de se construir duas paredes voltadas a Sul – uma em vidro e outra opaca)

6.2. Fachada ventilada

6.2.1. Introdução

A realização de fachadas tem sofrido uma grande evolução ao longo dos anos, motivada fundamentalmente pelo aparecimento de novos materiais e novos sistemas construtivos, entre os quais podemos incluir o isolamento pelo exterior dos edifícios e a criação de uma camada protectora da parede.

A investigação ao nível de soluções construtivas para paredes exteriores tem evoluído no sentido de soluções cada vez menos espessas e, por conseguinte, mais leves; compostas por uma série de camadas com funções cada vez mais específicas.

Dentro desta tendência surgiu a fachada ventilada. Este tipo de fachada tanto pode ser utilizada na reabilitação de edifícios que apresentem problemas – por exemplo, de isolamento térmico e acústico, falta de estanquidade à água, ou de fissuração – como na construção de novos edifícios. Esta solução contribui assim para a economia de energia e diminuição do risco de degradação precoce dos materiais, e evita pontes térmicas e condensações, dotando o edifício de uma maior qualidade e conforto.

Esta tecnologia construtiva está associada ao ressurgimento de soluções de paredes exteriores simples, que tinham caído em desuso a partir de meados do século XX. A figura 6.7 apresenta o exemplo de um edifício com fachada ventilada.

Figura 6.7 – Edifício com fachada ventilada (Pavilhão Multiusos, Guimarães)

6.2.2. Resumo das características técnico-funcionais

1) Constituição

As fachadas ventiladas são compostas, do exterior para o interior, pelos seguintes elementos (fig. 6.8):

- Revestimento descontínuo, fixado ao elemento de suporte;
- Caixa-de-ar ventilada;
- Estrutura de fixação;
- Camada de isolamento contínuo sobre o paramento exterior do elemento de suporte;
- Elemento de suporte.

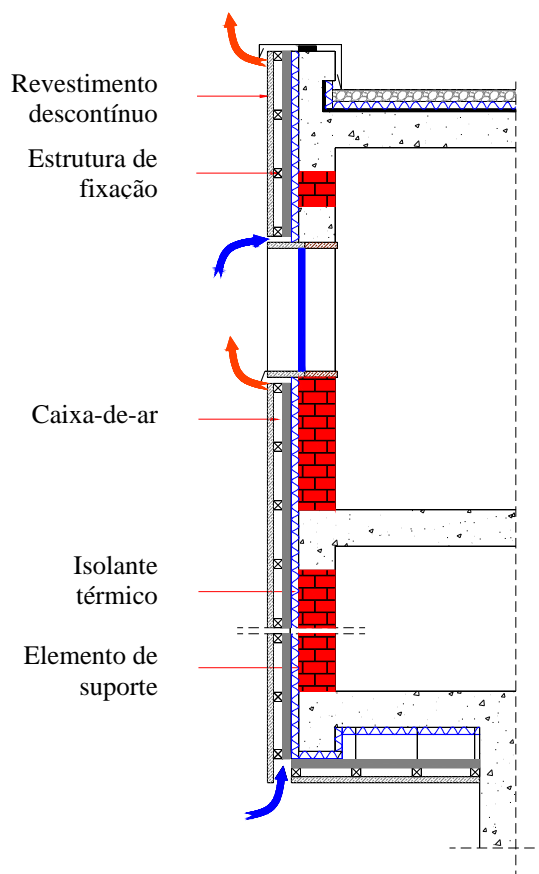



Figura 6.8 – Representação esquemática de uma fachada ventilada

O **revestimento descontínuo** é não-isolante e independente[1] e pode ser, por exemplo, em pedra natural (p.e.: granito, xisto, etc), material cerâmico ou vidro. O revestimento é fixado mecanicamente ao elemento de suporte, através de uma estrutura de fixação, e para além da sua função estética, funciona como capa de impermeabilizante da parede.

A **estrutura de fixação** deve permitir o afastamento do revestimento em relação ao elemento de suporte, de modo a estabelecer uma caixa-de-ar entre os dois elementos. A estrutura deve permitir deformações para a absorção de tensões por dilatação e choques térmicos, incidência de ventos, etc. Esta estrutura apresenta uma série de componentes, que transferem as acções a que o revestimento está sujeito para o paramento portante. A estrutura é composta por:

- Perfis verticais – geralmente em alumínio ou aço inoxidável, ancorados no elemento de suporte;
- Perfis horizontais – geralmente em alumínio ou aço inoxidável, onde as peças de revestimento se fixam através de dispositivos de fixação.
- Complementos – dispositivos de fixação, de remate, etc.

A **caixa-de-ar** formada entre o revestimento e o paramento externo do elemento de suporte apresenta dimensões no intervalo dos 5 a 15 cm e tem o objectivo de permitir a ventilação contínua no sentido vertical através do efeito chaminé. Na caixa-de-ar e sobre o paramento exterior do elemento de suporte é fixado o isolamento térmico.

2) Exemplos de sistemas de fixação e sequência de montagem

O sistema de fachada ventilada consiste na colocação de, por exemplo, peças de pedra natural, peças cerâmicas ou de vidro, sobre uma estrutura de alumínio ou aço inoxidável, previamente fixa à parede existente. A união das peças de revestimento à estrutura realiza-se através de encaixes metálicos.

A maior parte dos sistemas de fixação para fachadas ventiladas baseiam-se em estruturas portantes de perfis de alumínio verticais – com comprimento máximo de 3m – fixos à parede, ligados mecanicamente a perfis horizontais de alumínio, aos quais se unem os encaixes que seguram as peças de revestimento.

Através da forma como se ligam as peças de revestimento à estrutura de suporte, é possível distinguir **dois tipos de sistemas de fixação**:

(i) **Sistemas de encaixe visível**;

(ii) **Sistemas de encaixe invisível**.

---

[1] Designado na literatura inglesa e francesa respectivamente por “cladding” e “bardage”.

2.1) Sistemas de encaixe visível

Nos sistemas de encaixe visível, a fixação das peças de revestimento à estrutura de suporte é realizada através de grampos visíveis protegidos contra a corrosão (fig. 6.9). Os sistemas de encaixe visível são uma solução económica, versátil e flexível em obra, pois a peça de revestimento não necessita de vir acoplada a algum tipo de dispositivo de ligação, tal como acontece nos sistemas de encaixe invisível.

Para evitar vibrações devido ao vento, devem-se utilizar juntas elásticas – por exemplo, de neoprene – entre os grampos e as peças, ou então efectuar-se uma selagem com silicone.

2.2) Sistemas de encaixe invisível

Nestes sistemas, tem de se aplicar previamente na peça de revestimento um dispositivo que permita a sua fixação à estrutura – o grampo de sustentação. É recomendável a utilização de um encaixe roscado, pois é o que garante maior estabilidade.

As peças são fixadas aos perfis horizontais, encaixando os grampos nesses perfis (fig. 6.10).

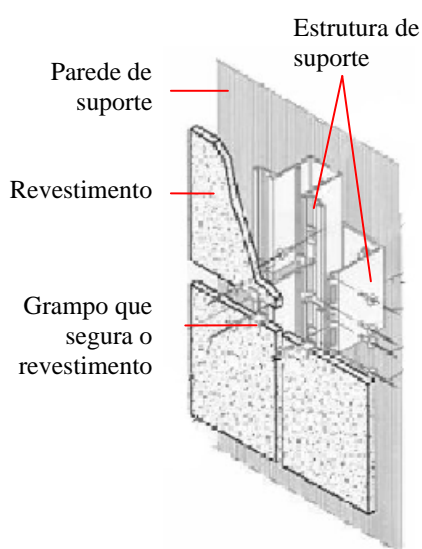



Figura 6.9 – Encaixes visíveis – detalhe de colocação (sistema da "Roca - Cerâmica")

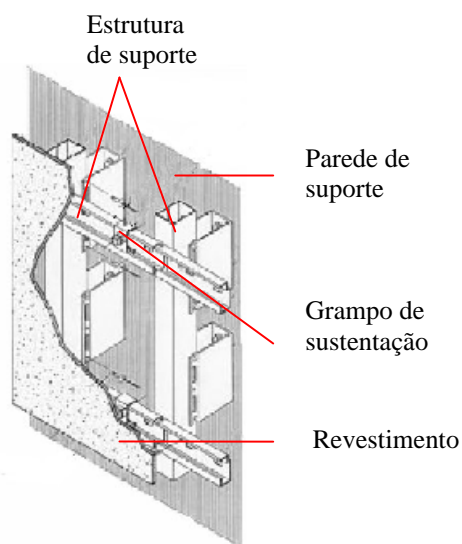



Figura 6.10 – Encaixes invisíveis – detalhe de colocação (sistema da "Roca - Cerâmica")

2.3) Sequência de montagem

Depois de concluído o elemento de suporte e de se colocar o isolante térmico contínuo sobre o paramento, monta-se a estrutura de fixação, constituída pelos perfis verticais e horizontais (se forem necessários) (fig.6.11-1). De seguida, enroscam-se os grampos de sustentação na peça de revestimento (fig. 6.11-2). Seguidamente a peça de revestimento é colocada, encaixando-se os

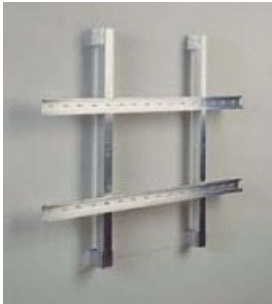
grampos de sustentação nas vigas horizontais (fig. 6.11-3). Para se garantir uma maior estabilidade ao revestimento, os grampos superiores são aparafusados às vigas horizontais (fig. 6.11-4). Por fim, realizam-se os ajustes necessários de modo a garantir o nivelamento do paramento exterior (fig. 6.11-5).

<table>
<tr><td>
1 – Montagem da estrutura de fixação, sobre o elemento de suporte</td><td>
2 – Aplicação dos grampos de sustentação na peça</td></tr>
<tr><td>
3 – Colocação da peça de revestimento</td><td>
4 – Aparafusamento dos grampos superiores ao perfil horizontal</td></tr>
<tr><td colspan="2">
5 – Ajuste da peça</td></tr>
</table>

Figura 6.11 – Sequência de montagem de fachada ventilada - exemplo (sistema da “Roca - Cerâmica”)

3) Aspectos elementares de funcionamento

A execução de uma camada de revestimento não-isolante descontínuo sobre a parede protege o elemento de suporte (parede) e o isolamento térmico contra as intempéries, o que aumenta a **durabilidade** do conjunto.

O efeito chaminé, que se forma no interior da caixa-de-ar, permite a **eliminação de condensações** ou de alguma **humidade** da chuva que tenha atravessado o revestimento (fig. 6.8). Desta forma, o isolamento térmico e o pano interior encontram-se perfeitamente protegidos contra a humidade. Podem assim ser utilizados certos materiais naturais de isolamento térmico, que por serem mais sensíveis à humidade, não são utilizados correntemente no isolamento das fachadas convencionais – por exemplo, a cortiça e a fibra de coco.

O facto do **isolamento térmico** ser contínuo, torna-o mais eficiente, pois eliminam-se ou previnem-se as pontes térmicas, daí que esta solução seja muito utilizada na reabilitação de fachadas com problemas de isolamento térmico. A aplicação do isolamento sobre o paramento exterior faz com a capacidade térmica da parede esteja totalmente disponível para a inércia térmica interior do edifício. A ventilação impede que o ar existente na câmara aqueça, evitando--se a transmissão de calor por convecção, para o interior. Deste modo, esta solução promove a diminuição dos consumos energéticos tanto durante a estação de aquecimento com de arrefecimento.

Quanto ao **isolamento acústico**, o seu comportamento é substancialmente melhor do que o de uma fachada convencional, pois o revestimento descontínuo dissipa parte da energia sonora incidente.

Esta solução apresenta geralmente elevada **estabilidade estrutural**, pois o revestimento ao ser descontínuo previne o risco de fissuração devido às amplitudes térmicas diurnas e sazonais. Também não existe transmissão de cargas entre as placas, já que as fixações são independentes.

A existência de elementos de revestimento totalmente independentes permite a substituição isolada de alguma peça danificada, o que torna a sua **manutenção** simples e pouco dispendiosa.

Ao nível da **resistência ao fogo**, há que ter em conta que a caixa-de-ar actua como propagador vertical de fogo. Para evitar esta situação deve-se compartimentar a caixa-de-ar com barreiras horizontais e verticais, resistentes ao fogo (fig. 6.12).

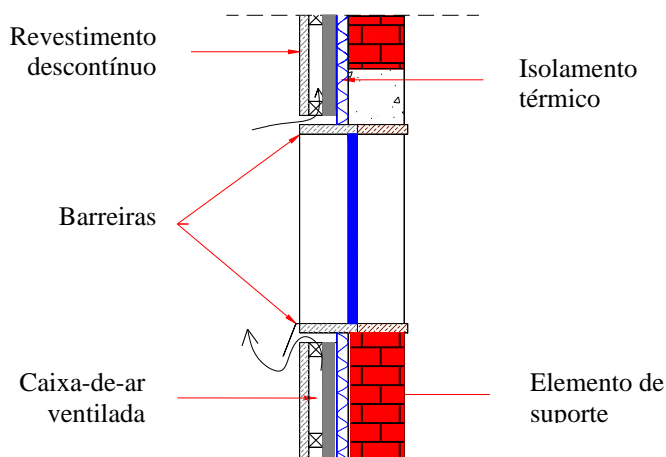



Figura 6.12 – Barreiras contra a propagação vertical do fogo

Por fim, as fachadas ventiladas apresentam a possibilidade de se utilizar o espaço vazio, entre o elemento de suporte e o revestimento, para a passagem de instalações hidráulicas e eléctricas. O afastamento adequado entre os paramentos possibilita o alojamento de todas as instalações, as quais são visitáveis no caso de avarias e/ou manutenção.

6.2.3. Vantagens inconvenientes da fachada ventilada

No quadro 6.2 são apresentadas as principais vantagens e reservas da fachada ventilada, relativamente à fachada convencional – parede dupla com isolamento na caixa-de-ar.

Quadro 6.2 – Principais vantagens e inconvenientes da fachada ventilada

Vantagens	Inconvenientes
• Isolamento térmico mais eficiente e disponibilidade total da capacidade térmica da parede para a inércia térmica interior (diminuição do consumo energético para climatização e menores amplitudes térmicas no interior); • Risco muito reduzido de fissuração do revestimento (diminuição dos efeitos da dilatação térmica); • Manutenção simples e reduzida; • Protecção do isolamento térmico, estrutura do edifício e parede contra as intempéries (maior durabilidade); • Eliminação das condensações. A presença da camada de ar facilita a evacuação do vapor de água proveniente do interior e favorece a eliminação de humidades que podem causar infiltrações; • A existência de isolamento térmico pelo exterior permite a execução de paredes de fachada de menor espessura, mas com o mesmo comportamento (maximização da área útil interior); • Melhor isolamento sonoro; • Grande potencial na reabilitação do comportamento térmico, higroscópico e acústico das fachadas convencionais.	• Condiciona a aspecto exterior do edifício; • Dificuldade eventual na execução de remates, zonas de cunhais e saliências; • Custo geralmente mais elevado; • Maior risco de degradação por vandalismo; • A caixa-de-ar, se não for seccionada, facilita a propagação de fogo entre pisos.

PARTE III

ANALISE COMPARATIVA DA SUSTENTABILIDADE DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA PAVIMENTOS E PAREDES EXTERIORES

CAPÍTULO 7

OBJECTIVOS E METODOLOGIA ADOPTADA

7.1. Objectivos

Nesta parte, pretende-se realizar uma análise comparativa entre várias soluções construtivas existentes ao nível dos pavimentos e paredes exteriores. Este estudo visa avaliar a sustentabilidade de cada solução construtiva, através da sua comparação com a solução mais corrente nos edifícios em Portugal.

Em primeiro lugar será desenvolvida uma metodologia adequada à análise comparativa da sustentabilidade de soluções construtivas. A metodologia desenvolvida, ainda que simples, por englobar o estudo de um reduzido número de parâmetros, poderá constituir uma base para futuras investigações que abordem o desenvolvimento de sistemas mais complexos de análise da sustentabilidade de soluções construtivas e/ou de sistemas de avaliação da sustentabilidade dos edifícios, adequados às soluções construtivas portuguesas.

Por fim, serão apresentados dois quadros resumo, um para os pavimentos e outro para as paredes exteriores, onde estão apresentados os resultados obtidos para cada uma das soluções construtivas analisadas. Estes resultados poderão servir de apoio aos projectistas na selecção das tecnologias construtivas a integrar num edifício, de modo a que os desígnios por uma construção mais sustentável sejam cada vez mais uma realidade.

7.2. Metodologia adoptada

Na avaliação da sustentabilidade podem ser abordados vários parâmetros que nem sempre estão correlacionados entre si e que não se expressam na mesma grandeza. Por outro lado, o modo como cada um dos parâmetros influencia a sustentabilidade não é consensual nem imutável ao longo do tempo. Assim, é difícil expressar a sustentabilidade em termos absolutos, através de um indicador que integre todos os parâmetros analisados e que permita a classificação do objecto analisado, relativamente à sua sustentabilidade. Por exemplo, uma solução que apresente boa performance ambiental e ao mesmo tempo não cumpra as exigências funcionais mínimas, não pode ser considerada sustentável. Por outro lado, uma solução com bom desempenho ambiental e que cumpra todas as exigências funcionais, mas em que o custo de construção ultrapassa largamente o custo da solução construtiva convencional, não poderá ser considerada sustentável, pois o seu custo proibitivo constitui uma barreira à sua implementação.

A sustentabilidade é assim uma questão relativa, que deve ser avaliada comparativamente e relativamente à prática corrente – a solução de referência – num determinado país/local. Deste modo, é possível verificar se, ao nível de cada parâmetro analisado, a solução em estudo é melhor ou pior do que a solução de referência. O patamar mínimo de sustentabilidade deve corresponder, numa primeira fase, à solução com mais expressão no mercado, devendo ser ajustado ao longo do tempo em função do desenvolvimento tecnológico. A solução mais sustentável depende daquilo que o limite tecnológico pode proporcionar em cada momento.

Em países onde a sustentabilidade da Construção é uma temática relevante encontram-se a ser aplicados e/ou em fase de desenvolvimento, alguns sistemas e ferramentas de avaliação da sustentabilidade. Desses destacam-se os seguintes:

- **Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM)**, desenvolvido no Reino Unido (BRE, 2004);
- **Leadership in Energy & Environmental Design (LEED)**, desenvolvido nos Estados Unidos (USGBC, 2004);
- **Green Building Challenge (GBTool)**, ferramenta desenvolvida no âmbito de um desafio internacional com vista à promoção e avaliação de projectos sustentáveis para edifícios (Greenbuilding, 2004).

Estes sistemas encontram-se sobretudo orientados para a avaliação do desempenho ambiental edifícios, numa perspectiva global, em que as principais áreas de verificação se encontram descritas no quadro 7.1. A sustentabilidade das soluções construtivas é um dos parâmetros considerados na avaliação da sustentabilidade global dos edifícios. A aplicação destes sistemas de avaliação pressupõe a utilização de soluções construtivas que constam nas suas bases de dados ou o conhecimento prévio das características de cada solução, pelo que a sua aplicação em Portugal ou em outros países que não o de origem, nem sempre é possível devido à especificidade das soluções construtivas. Será assim necessário adaptar estes sistemas às soluções construtivas que se integram nos edifícios portugueses, em que o primeiro passo consistirá em desenvolver bases de dados que reúnam as principais características das soluções construtivas.

Quadro 7.1 – Principais áreas de verificação nos sistemas mais relevantes de avaliação da sustentabilidade dos edifícios (fonte: Pinheiro, 2003)

	Sistemas de avaliação		
	BREEAM	**LEED (2.0)**	**GBTool (1.8)**
Principais áreas de verificação	• Energia; • Transporte; • Poluição; • Materiais; • Água; • Ecologia e uso do solo; • Saúde e bem-estar	• Sustentabilidade dos locais; • Eficiência de água; • Energia e atmosfera; • Materiais e recursos; • Qualidade do ar interior; • Inovação e desenho.	• Consumo de recursos; • Cargas ambientais; • Qualidade do ar interior; • Qualidade do serviço; • Economia; • Gestão de pré operações; • Transporte.

Como já se referiu, os sistemas de avaliação da sustentabilidade existentes não são adequados à avaliação das soluções construtivas. Desenvolve-se, assim, uma metodologia específica para a análise de soluções construtivas que será aplicada a algumas soluções convencionais e não convencionais na Indústria da Construção portuguesa. Os resultados obtidos são passíveis de ser utilizados na aplicação de sistemas de avaliação da sustentabilidade global de edifícios.

Neste trabalho, propõem-se que a avaliação da sustentabilidade das soluções construtivas se realize através de uma metodologia de análise relativa, cuja base de comparação é, para cada elemento construtivo, a solução construtiva mais aplicada – solução de referência. Esta metodologia desenvolvida especificamente no âmbito deste trabalho, a que foi atribuída a denominação de **Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas** (**MARS-SC**), aborda três grupos de parâmetros: **ambientais**, **funcionais** e **económicos**.

Depois de se estudarem, dentro de cada grupo, os parâmetros pretendidos, a comparação entre as diversas soluções construtivas é realizada através de **índices de comparação**. Estes índices expressam a relação de grandeza existente entre um determinado parâmetro na solução em estudo e o mesmo parâmetro na solução de referência, o que permite verificar se, relativamente a cada parâmetro analisado, a solução construtiva em estudo é melhor ou pior do que a solução de referência.

Para que o leitor tenha uma melhor percepção das diferenças existentes entre as diversas soluções construtivas, ao nível de cada parâmetro, os índices são representados graficamente.

Cada índice em estudo é representado por um vector com o comprimento proporcional ao valor do índice. Os vectores terão origem no mesmo ponto e a união dos pontos, correspondentes à outra extremidade, forma uma figura geométrica com o número de lados correspondente ao número de índices que são objecto de análise em simultâneo. À representação gráfica dos índices atribuiu-se a denominação de **Perfil Sustentável**.

O número de parâmetros focados dentro de cada grupo de parâmetros poderá ser ajustado em função do grau de complexidade que se pretenda para a avaliação, das características próprias de cada solução construtiva, das exigências funcionais que se pretenda que a solução satisfaça e dos dados disponíveis. Em cada grupo poder-se-ão abordar, entre outros, os parâmetros apresentados no quadro 7.2.

Quadro 7.2 – Exemplos de parâmetros que podem ser abordados na Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC)

PARÂMETROS		
Ambientais	**Funcionais**	**Económicos**
• Massa; • Energia primária incorporada (PEC); • Quantidade incorporada de matéria-prima reciclada; • Potencial de reutilização; • Potencial de reciclagem; • Reservas remanescentes de matéria-prima; • Distância média de transporte dos materiais/ produtos necessários; • Potencial de aquecimento global (PAG); • Quantidade de água incorporada.	• Isolamento sonoro a sons de condução aérea; • Isolamento sonoro a sons de percussão; • Isolamento térmico; • Durabilidade; • Comportamento ao fogo; • Construtibilidade; • Flexibilidade; • Inovação e desenho.	• Custo de construção; • Custo de manutenção; • Custo de reabilitação; • Custo de desmantelamento/ demolição; • Valor venal; • Custo do tratamento para devolução ao ambiente natural.

Na aplicação da MARS-SC às soluções construtivas analisadas neste trabalho são abordados **dois parâmetros ambientais**, **três funcionais** e **um económico**.

Ao nível dos parâmetros **ambientais** são analisadas a massa da solução construtiva e a energia primária incorporada por unidade de superfície. No estudo dos parâmetros **funcionais** abordam--se o comportamento acústico e o isolamento térmico de cada solução construtiva e, no caso das paredes, o espaço ocupado. O comportamento acústico das soluções construtivas é caracterizado através do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,\ w}$) e nos elementos horizontais – pavimentos – é também considerado o índice de isolamento sonoro a sons de percussão ($L'_{n,w}$). O isolamento térmico das soluções construtivas é caracterizado através do coeficiente global de transmissão térmica (U). O espaço ocupado pelas paredes é caracterizado através da sua largura total. No caso das paredes, a largura das paredes é um parâmetro importante, na medida em que influencia a área útil dos edifícios. Ao nível dos parâmetros **económicos** é abordado o custo de construção.

Para os pavimentos são determinados, através das expressões apresentadas no quadro 7.3, os índices de massa (I_m), de energia primária incorporada – PEC (I_{PEC}), de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($I_{Dn,w}$), de isolamento sonoro a sons de percussão ($I_{L'n,w}$), de transmissão térmica média (I_{Umed}) e de custo de construção (I_{cc}).

Quadro 7.3 – Índices de comparação utilizados na análise comparativa das soluções construtivas

i) Índice de peso ($\mathbf{I_m}$)	ii) Índice de energia primária consumida ($\mathbf{I_{PEC}}$)
$I_m = \dfrac{m_{estudo}}{m_{referência}}$ com, m_{estudo} –Massa da solução em estudo; $m_{referência}$ – Massa da solução de referência.	$I_{PEC} = \dfrac{PEC_{estudo}}{PEC_{referência}}$ com, PEC_{estudo} – Energia primária incorporada da solução em estudo; $PEC_{referência}$ – Energia primária incorporada da solução de referência.
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($\mathbf{I_{Dn,w}}$)	**iv) Índice de isolamento sons de percussão ($\mathbf{I_{L'n,w}}$)**
$I_{Dn,w} = \dfrac{Dn,w_{referência}}{Dn,w_{estudo}}$ com, $Dn,w_{referência}$ – Isolamento a sons de condução aérea da solução de referência; Dn,w_{estudo} – Isolamento a sons de condução aérea da solução em estudo.	$I_{L'n,w} = \dfrac{L'n,w_{estudo}}{L'n,w_{referência}}$ com, $L'n,w_{estudo}$ – Isolamento a sons de percussão da solução em estudo; $L'n,w_{referência}$ – Isolamento a sons de percussão da solução de referência.

Quadro 7.3 (cont.) – Índices de comparação utilizados na análise comparativa das soluções construtivas

v) Índice de transmissão térmica média (**I_{Umed}**)	vi) Índice de custo de construção (**I_{cc}**)
$I_{Umed} = \frac{Umed_{estudo}}{Umed_{referência}}$ com, $Umed_{estudo}$ – Coeficiente global médio de transmissão térmica da solução em estudo; $Umed_{referência}$ – Coeficiente global médio de transmissão térmica da solução de referência.	$I_{cc} = \frac{cc_{estudo}}{cc_{referência}}$ com, cc_{estudo} – Custo de construção da solução em estudo; $cc_{referência}$ – Custo de construção da solução de referência.

Para as paredes, o índice de isolamento a sons de percussão é substituído pelo índice de espaço ocupado (I_{eo}) – que pretende traduzir a relação existente ao nível da espessura total das paredes – e o índice de transmissão térmica média pelo índice de transmissão térmica (I_U) – neste elemento não se torna necessário averiguar o isolamento térmico da solução para as duas direcções do fluxo de calor: ascendente (Inverno) e descendente (Verão). No quadro 7.4 apresentam-se as expressões utilizadas na quantificação desses índices.

Quadro 7.4 – Índices de comparação utilizados na análise comparativa das soluções construtivas (cont.)

vii) Índice de transmissão térmica (**I_U**)	viii) Índice de espaço ocupado (**I_{eo}**)
$I_U = \frac{U_{estudo}}{U_{referência}}$ com, U_{estudo} – Coeficiente global de transmissão térmica da solução em estudo; $U_{referência}$ – Coeficiente global de transmissão térmica da solução de referência.	$I_{eo} = \frac{eo_{estudo}}{eo_{referência}}$ com, eo_{estudo} – Espaço ocupado pela solução em estudo; $eo_{referência}$ – Espaço ocupado pela solução de referência.

Calculados os índices de comparação é possível avaliar, ao nível de cada parâmetro, se a solução construtiva em estudo é melhor ou pior do que a solução construtiva de referência (quadro 7.5).

Quadro 7.5 – Avaliação das soluções construtivas, relativamente à solução de referência, através dos índices de comparação

Valor do índice	**Avaliação**
< 1	Solução em estudo melhor do que a solução de referência
≈ 1	Solução em estudo idêntica à solução de referência
> 1	Solução em estudo pior do que a solução de referência

Os seis índices são, por fim, representados em vectores, cujo comprimento expressa o valor do índice. Os vectores na solução de referência terão desenvolvimento unitário, e a figura formada – o **perfil sustentável** – pela união dos pontos correspondentes a uma das extremidades dos vectores será, atendendo ao número de parâmetros analisados, hexagonal (fig. 7.1). A título de exemplo, no caso dos pavimentos e numa situação semelhante à da figura 7.2, a solução em estudo será, a todos os níveis, melhor do que a solução de referência, pelo que, se poderá considerar mais sustentável, atendendo aos parâmetros analisados. Quanto menor a área da figura geométrica formada pela união dos pontos relativos a cada índice, mais sustentável será a solução.

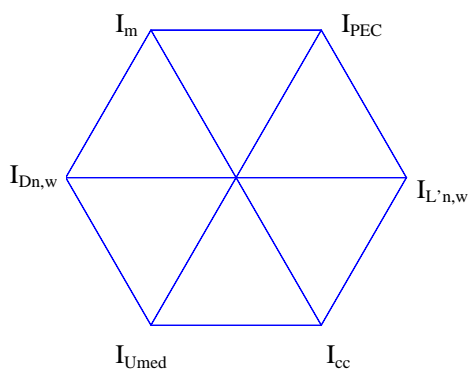



Figura 7.1 – Perfil sustentável da solução de referência

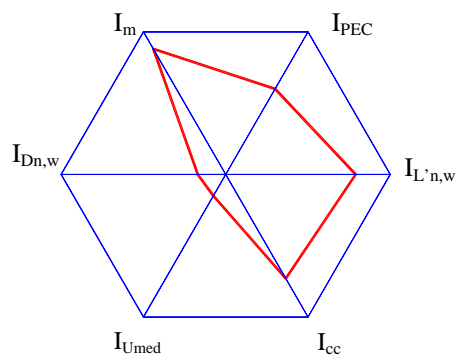



Figura 7.2 – Representação perfil sustentável da solução em estudo sobre o perfil sustentável da solução de referência

A metodologia adoptada na avaliação comparativa das soluções construtivas encontra-se esquematizada na figura 7.3.

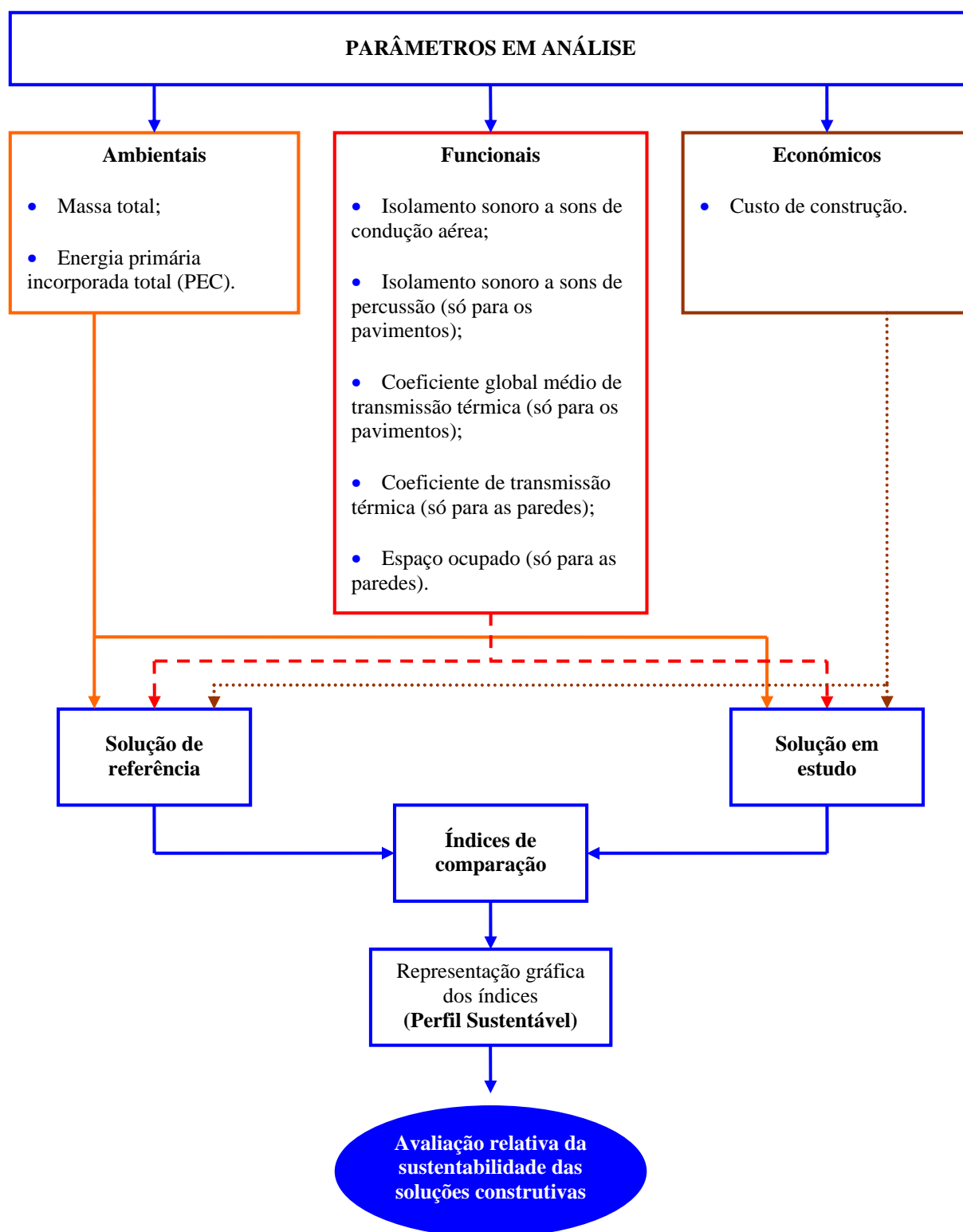



Figura 7.3 – Representação esquemática da Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC)

Seguidamente, realiza-se uma descrição sucinta do método adoptado na quantificação de cada um dos parâmetros.

7.2.1. Parâmetros ambientais

Como já foi referido no capítulo 3, a performance ambiental de uma solução construtiva pode ser caracterizada através de vários parâmetros: massa da solução, energia primária incorporada, potencial de aquecimento global, potencial de reciclagem, potencial de reutilização, toxidade dos materiais utilizados, quantidade de água utilizada na sua produção, etc.

A quantificação de alguns dos parâmetros mencionados nem sempre é fácil. Por exemplo, o potencial de reciclagem e o potencial de reutilização são parâmetros difíceis de expressar numericamente. Estes parâmetros dependem de alguns factores como o estado de conservação dos materiais ou produtos que compõem a solução construtiva no final do ciclo da sua vida útil, das soluções arquitectónicas e construtivas correntes numa determinada época, do modo como os produtos ou materiais de construção se encontram ligados entre si, do estágio de desenvolvimento tecnológico ao nível das soluções de reciclagem – o que hoje não é possível reciclar, talvez no futuro o venha a ser –, etc. Também a toxidade dos materiais é de difícil avaliação, pois nem sempre é possível obter as *Material Safety Data Sheets* (MSDS) dos materiais de construção com a identificação dos compostos químicos utilizados directa e/ou indirectamente na sua produção.

Atendendo à dificuldade que existe na determinação de alguns dos parâmetros ambientais das soluções construtivas, são apenas abordados aqueles cuja quantificação é menos complexa e que conduzem a resultados mais fidedignos: a **energia primária incorporada** (PEC) e o **peso das soluções construtivas**.

Ao nível da energia primária incorporada (PEC), já existem algumas publicações que abordam esta temática. No entanto, não existem dados concretos para Portugal, pelo que os valores que constam nessas publicações estão relacionados com as condições particulares da Indústria da Construção dos países de origem que, na maior parte das vezes, são muito distintas das do mercado português. Atendendo ao relativo atraso tecnológico da indústria portuguesa, os valores da energia incorporada nos materiais de construção para o mercado português poderão ser superiores aos valores apresentados. No entanto, optou-se por abordar este parâmetro, pois os valores apesar de distintos no mercado português devem, no entanto, apresentar as mesmas relações de grandeza, o que vai ao encontro do objectivo traçado para o presente estudo, onde se pretende realizar uma análise comparativa entre diversas soluções construtivas. A quantificação do peso das soluções construtivas é importante, pois a maior parte dos parâmetros enunciados estão correlacionados com este parâmetro.

Quanto menor for o peso e a PEC, menor será a contribuição da solução construtiva na delapidação dos recursos naturais e nos consumos energéticos associados à Indústria da Construção.

O quadro 7.6 apresenta a massa volúmica aparente, a condutibilidade térmica (?) e a energia primária incorporada (PEC), associados a cada material/produto utilizado na materialização das diversas soluções construtivas estudadas.

Quadro 7.6 – Massa volúmica aparente média, condutibilidade térmica (?) e energia primária incorporada (PEC), associados a cada material/produto de construção (fontes: Santos *et al*, 1990; Berge, 2000 e outras)

Material/produto	Massa volúmica aparente média (kg/m^3)	Condutibilidade térmica - ? (W/m.ºC)	Energia primária incorporada – PEC (kWh/kg)
Aço (100% reciclado)	7780	52,00	2,77
Aglomerado de fibras de madeira (OSB)	925	0,012	4,17
Aglomerado negro de cortiça	140	0,045	1,11
Argamassa de assentamento	1950	1,15	0,28
Argamassa de reboco	1950	1,15	0,28
Betão armado	2500	1,75	-
Betão celular autoclavado	720	0,16	1,11
Betão de argila expandida	750	0,25	1,11
Betão simples	2400	1,75	0,28
Blocos cerâmicos	-	-	0,83
Gesso cartonado	900	0,35	1,39
Lã de rocha	40	0,040	4,45
Madeira	350	0,12	0,83
Pedra (em alvenaria)	2600[1]	3,00[1]	0,03
Poliestireno expandido extrudido (XPS)	32,5	0,035	20,00
Poliestireno expandido moldado (EPS)	20	0,040	20,00
Polietileno	940	0,40	18,60
Revestimento cerâmico	2000	-	2,22

7.2.2. Parâmetros funcionais

7.2.2.1. Comportamento acústico

1) Conceitos gerais

O comportamento acústico de um elemento de separação é um factor que deve influenciar a opção por uma determinada solução construtiva.

---

[1] Inclui argamassa nas juntas de assentamento.

O aumento do número de fontes ruidosas no exterior e no interior dos edifícios aliado ao facto do isolamento acústico das soluções construtivas não ter acompanhado este acréscimo, tem conduzido à degradação, em alguns casos bastante acentuada, da qualidade de vida das populações. Esta degradação tem-se repercutido não só na diminuição do conforto acústico dos espaços habitados como na deterioração da saúde dos seus ocupantes, estando associada ao aparecimento de problemas psíquicos (stress e irritabilidade), fisiológicos (perturbação do sono) e auditivos (desde a fadiga até ao trauma) (Mateus, *et al*, 1999).

A aplicação da acústica no estudo do comportamento dos edifícios é geralmente realizada a três diferentes níveis (APICER, 98):

- **Estudo da propagação de sons entre dois espaços limitados por uma separação física**, geralmente denominado por estudo do isolamento acústico e que depende essencialmente da massa e da estanquidade dos elementos que separam os dois locais;

- **Estudo da propagação do som no interior de um espaço fechado**, denominado de correcção acústica ou acondicionamento acústico do local. Este estudo visa assegurar que os espaços fechados apresentem características acústicas compatíveis com o tipo de actividade que se pretende desenvolver no seu interior. Este comportamento depende essencialmente do volume do espaço, do tipo de revestimentos interiores e do tipo de recheio previstos;

- **O estudo da propagação do som por via sólida**. Os choques ou outras acções mecânicas aplicadas directamente nos elementos de construção produzem sons que são conhecidos por sons ou ruídos de percussão. Estes sons podem ser provocados, por exemplo, por marteladas em paredes, arrastamento de móveis, passos em pavimentos – principalmente quando se utilizam saltos duros –, etc. Ao contrário dos ruídos de condução aérea, que em geral só afectam os locais mais próximos da fonte de ruído, os ruídos de percussão podem estender-se a todo o edifício.

As soluções construtivas de pavimentos e paredes, como elementos separadores entre espaços, são responsáveis por assegurar a qualidade de vida dos utilizadores neste domínio, devendo manter os níveis sonoros nos espaços habitados dentro de valores aceitáveis e regulamentares. Assim, para cada solução construtiva vai-se estudar a sua capacidade em atenuar o nível sonoro das ondas sonoras que a atravessam. Nos elementos verticais, tendo em conta a baixa probabilidade de serem solicitados por choques ou outras acções mecânicas, a forma de comportamento acústico que mais importa destacar prende-se com o isolamento sonoro a sons de condução aérea. Nos elementos horizontais será também avaliado o comportamento a sons de percussão.

A relação das soluções construtivas com o acondicionamento acústico dos espaços é mínima, pois depende essencialmente, como já foi referido, do volume do espaço e dos tipos de revestimentos utilizados, pelo que este parâmetro não será abordado.

O isolamento a sons de condução área é caracterizado através do índice de isolamento sonoro a sons aéreos ($D_{n,w}$) e o isolamento sonoro a sons de percussão através do índice de isolamento a

sons de percussão ($L'_{n,w}$). De seguida explica-se sucintamente as metodologias seguidas para a quantificação dos índices de isolamento sonoro.

1) Índice de isolamento a sons aéreos ($D_{n,w}$)

Da energia sonora que incide num elemento de separação, uma parte é dissipada sob a forma de calor e a restante é transmitida pela parede a outros locais. A transmissão sonora, por via área, entre dois recintos é um fenómeno complexo que pode envolver simultaneamente transmissões directas – quando as transmissões ocorrem através do elemento de separação comum aos dois recintos –, e transmissões indirectas ou marginais – quando as transmissões tomam lugar através dos elementos construtivos adjacentes.

Neste trabalho, como se pretende avaliar unicamente o comportamento acústico das soluções construtivas na zona corrente, serão ignoradas as transmissões indirectas. Mesmo considerando apenas a transmissão por via directa, o fenómeno de transmissão não é simples, pois envolve uma série de factores, entre os quais se destacam:

- Frequência do som incidente no elemento separador;
- Massa do elemento;
- Ângulo de incidência das ondas sonoras;
- Porosidade do elemento;
- Rigidez do elemento.

Existem alguns métodos que permitem estimar numericamente o índice de isolamento sonoro a sons aéreos. Neste estudo recorreu-se ao **Modelo Misto** proposto por Meisser (Meisser, 1973) e cuja adequação às soluções construtivas portuguesas foi estudada por Diogo Mateus e António Tadeu (Mateus *et al*, 1999). A explicação do método ultrapassa os objectivos deste documento, pelo que se aconselha ao leitor interessado e menos familiarizado com esta matéria, a leitura das obras anteriormente referenciadas. No entanto, serão seguidamente apresentados alguns dados e equações que justificam as curvas de isolamento sonoro a sons aéreos apresentados nos Anexos I e II.

1.1) Aplicação da lei da massa

O índice de redução sonora de um elemento de construção é tanto maior quanto maior for a sua massa. Esta relação é conhecida pela **Lei da Massa**. Num hipotético elemento, onde se despreza a rigidez e o amortecimento, é possível estabelecer, através de um modelo inercial, uma lei da massa teórica que se traduz num acréscimo de isolamento sonoro do elemento de separação de 6 dB por cada duplicação da massa ou duplicação da frequência do som, no caso de elementos de construção simples. Para os elementos duplos e triplos, segundo Meisser (Meisser, 1973), é possível considerar-se uma lei teórica da massa com inclinação média de 8 dB.

Este autor considera ainda, na previsão do índice de isolamento acústico, uma lei experimental da massa, traduzida nos elementos simples, duplos e triplos, por um acréscimo de 4 dB, 6 dB e 10 dB, respectivamente, por cada duplicação da massa ou duplicação da frequência.

Neste modelo de estimação, para o traçado da curva de isolamento é considerada a lei experimental da massa, mas com um posterior ajustamento ao modelo analítico, considerando a lei teórica da massa e as quebras de isolamento nas frequências próprias de vibração transversal por flexão e por efeito de coincidência.

A partir da análise experimental, verificou-se que o índice de isolamento acústico, na frequência de 500 Hz e para uma massa de 100 kg/m^2 era de 40 dB. Assim, a lei experimental da massa, para um som de 500 Hz (m em kg/m^2), pode ser expressa através da seguinte equação:

$$R_{500Hz} = 13{,}3 Log(m) + 13{,}4\ dB \qquad [7.2.1]$$

Em elementos de separação pesados, cuja massa é igual ou superior a 200 kg/m^2, da análise experimental verifica-se que é possível considerar para a lei da massa uma maior inclinação, pelo que este comportamento se aproxima à seguinte equação:

$$R_{500Hz} = 14{,}3 Log(m) + 11{,}1\ dB \qquad [7.2.2]$$

No caso de elementos duplos, o índice de isolamento acústico para os 500 Hz é obtido através da lei experimental da massa, resultante das equação 7.2.1 ou 7.2.2, acrescentando-lhe a diferença de isolamento entre elementos simples e duplos com a mesma massa superficial total (Dif.), como se pode observar na equação 7.2.3. Nas soluções correntes com caixas-de-ar com largura na gama dos 2 a 4 cm, esta diferença é, para a frequência dos 500 Hz, próxima dos 4 dB. Quando as caixas-de-ar apresentam largura superior a 4 cm a diferença é muito maior, podendo atingir os 9 dB no caso de soluções com painéis cujas massas não são muito diferentes.

$$R_{500Hz} = 14{,}3 Log(m) + 11{,}1\ dB + Dif. \qquad [7.2.3]$$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto das massas e caixa-de-ar

A frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos duplos através da equação 7.2.4.

$$fr = 84\sqrt{\frac{1}{d}\left(\frac{1}{m1} + \frac{1}{m2}\right)} \qquad [7.2.4]$$

em que:

d – largura da caixa-de-ar (m);

m_i – massa do pano i (kg/m^2).

Quando o valor da frequência de ressonância se situa fora da zona audível, isto é, geralmente abaixo dos 100 Hz, é desprezada a perturbação que ocorre na curva de isolamento sonoro na

frequência de ressonância do conjunto. Quando a frequência de ressonância é superior a 100 Hz deve-se corrigir o elemento construtivo, aumentando a largura da caixa-de-ar e/ou a massa de cada um dos panos.

1.3) Frequências de ressonância da caixa-de-ar

As reflexões múltiplas das ondas sonoras que se verificam no interior da caixa-de-ar são responsáveis por quebras na curva de isolamento sonoro.

A frequência de ressonância da caixa-de-ar pode ser desprezada sempre que se utilize um material absorvente na caixa-de-ar. É importante ter em conta este fenómeno no caso de elementos duplos cuja caixa-de-ar não apresente um material absorvente como, por exemplo, nos vidros duplos.

1.4) Frequência crítica

As quebras de isolamento acústico a considerar na zona da frequência crítica dependem do amortecimento interno do material que constitui o elemento de separação. A quebra por efeito de coincidência correspondente a cada material com espessura unitária, assim como a frequência em que ocorre essa quebra – frequência crítica – estão apresentadas no quadro 7.7.

Quadro 7.7 – Frequências críticas e quebras associadas, para diferentes materiais (fontes: Mateus *et al*, 1999 e outras)

Material/produto	Frequência crítica para 1 cm de espessura (Hz)	Quebra por efeito de coincidência (dB)
Borracha	85 000	4
Cortiça	18 000	4
Poliestireno expandido	14 000	5
Madeira	6 000 a 18 000	6
Chumbo	8 000	5
Gesso	4 000	7
Betão celular autoclavado	3200	9
Tijolo maciço	2 500 a 5 000	9
Tijolo furado	2 000	9
Betão	1 800	8
Alumínio	1 300	10
Vidro	1 200	10
Aço	1 000	10

O valor da frequência crítica é calculado através da equação seguinte:

$$fc = \frac{fc_{1cm}}{esp.} \qquad [7.2.5]$$

em que:

fc_{1cm} – frequência crítica do elemento de construção para 1cm de espessura (Hz);

esp. – espessura do elemento (cm).

1.5) Determinação do valor de $D_{n,w}$

Na determinação do índice de isolamento sonoro, $D_{n,w}$, recorreu-se à comparação do traçado do índice de redução sonora com um traçado convencional de referência, de acordo com a metodologia referida na Norma Portuguesa NP-2073.

Após o ajustamento das duas curvas, o valor do índice de isolamento, $D_{n,w}$, corresponde ao valor que a curva de referência ajustada assume para a frequência de 500 Hz.

2) Índice de isolamento a sons de percussão ($L'_{n,w}$)

Os ruídos resultantes da percussão em pavimentos são considerados como os mais incomodativos, na medida em que afectam a maior parte das pessoas. Os sons de percussão são originários de fontes que produzem vibrações em estruturas sólidas e propagam-se por toda a estrutura quase sem amortecimento. Estes sons são normalmente produzidos a partir de passos sobre pavimentos, queda de objectos, batimentos de portas, actos de martelar, arrastamento de móveis, funcionamento de máquinas, vibração de canalizações, entre outros.

Os ruídos de percussão nas habitações são mais relevantes nas zonas em que se utilizam revestimentos mais rígidos, como por exemplo, cozinhas e casas de banho.

Parte da quantidade de energia produzida por um impacto é dissipada pelo elemento construtivo – no momento e na zona de aplicação do impacto e ao longo do material –, sendo a restante transmitida pelo material. A energia dissipada no momento e na zona de aplicação do impacto depende do tipo de revestimento aplicado no elemento construtivo: quanto mais flexível for o revestimento maior será a quantidade de energia dissipada. A quantidade de energia transmitida pelo material depende, em grande parte, da rigidez desse material: quanto maior a rigidez do material maior será a quantidade de energia transmitida.

O valor do índice de isolamento a sons de percussão foi estimado através do **método do invariante $D_{n,w}$ + $L'_{n,w}$**. Este método encontra-se devidamente documentado numa das publicações do LNEC (Patrício, 1999).

Neste método, o índice de isolamento a sons de percussão ($L'_{n,w}$), conferido pelos elementos de compartimentação horizontais – pavimentos –, estima-se a partir do conhecimento prévio do valor do índice de isolamento sonoro a sons aéreos ($D_{n,w}$). A determinação do índice de

isolamento sonoro ($L'_{n,w}$) é baseada no quadro 7.8 , que apresenta, para cada tipo de pavimento, um valor constante do invariante $D_{n,w} + L'_{n,w}$.

Quadro 7.8 – Tipificações de lajes de edifícios – método do invariante $D_{n,w} + L'_{n,w}$ (fonte: Patrício, 1999)

Tipo de Pavimento	Dn,w+L'n,w (Dn,w, dB) (L'n,w, dB/oit.)
Laje de betão não revestida (espessuras correntes)	130 a 135
Laje de betão revestida com tacos de madeira	120
Laje de betão com lajeta flutuante revestida com tacos de madeira	115
Pavimento de vigotas pré-esforçadas com blocos de cofragem e betão complementar	125 a 130
Laje de betão com piso flutuante de madeira	117

O isolamento sonoro a sons de percussão, para além de poder ser melhorado através da aplicação de um revestimento flexível, pode ainda ser corrigido através da aplicação de materiais isolantes intermédios – entre a laje de piso e a lajeta flutuante. O quadro 7.9 apresenta os valores de $\Delta L'_{n,w}$ obtidos experimentalmente no caso de pavimentos com lajeta flutuante. O parâmetro $\Delta L'_{n,w}$ apresenta a diferença entre o índice $\Delta L'_{n,w}$, em dB, antes e depois da execução da solução construtiva.

Quadro 7.9 – Reduções globais na transmissão de ruídos de percussão com laje flutuante (fonte: Mateus *et al*, 1999)

Natureza do revestimento de piso				$\Delta L'_{n,w}$ (dB/oit.)
Designação	Características do elemento resiliente			
	Material	Massa volúmica (kg/m³)	Espessura (mm)	
Lajeta flutuante de 40mm de espessura com a face aparente revestida a tacos de pinho.	Aglomerado negro de cortiça	95	10	19
		100	20	20
		100	10	18
		102	6	17
		112	10	18
		120	40	20
		140	12	18
		194	5	15
	Feltro betuminoso com granulado de cortiça	Massa volúmica do granulado (kg/m³)		
		52		19
		66		20
		114		21
		146		20

7.2.2.2. Isolamento térmico

O isolamento térmico das soluções construtivas é caracterizado através do coeficiente global de transmissão térmica (U). Este coeficiente, num elemento de construção de faces planas e paralelas, representa a quantidade de calor que o atravessa perpendicularmente, por unidade de tempo e superfície, quando sujeito a um gradiente unitário entre os ambientes que separa.

O valor máximo permitido para os coeficientes de transmissão térmica dos elementos de construção das envolventes dos edifícios encontra-se definido no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (R.C.C.T.E. – DL 40/90 de 6 de Fevereiro) (Quadro 9.1). Este parâmetro é obtido através da equação 7.2.6, que se aplica em casos em que o elemento é constituído por um ou vários materiais, em camadas de espessura constante.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{hi} + \sum_j R_j + R_{ar} + \frac{1}{he}} \qquad [7.2.6]$$

em que:

$1/h_i$ – resistência térmica superficial interior (m^2.ºC/W);

$R_j = e_j/?_j$ – resistência térmica da camada j (m^2.ºC/W);

e_j – espessura da camada j (m);

$?_j$ – condutibilidade térmica da camada j (W/m.ºC);

R_{ar} – resistência térmica dos espaços de ar não ventilados (m^2 ºC/W);

$1/h_e$ – resistência térmica superficial exterior (m^2. ºC/W).

A resistência térmica superficial ($1/h_e$, $1/h_i$) traduz o efeito da convecção e radiação, e o seu valor varia em função de diversos factores, tais como a rugosidade da superfície, posição da superfície, entre outros. Contudo, na prática são utilizados valores médios. Os valores das resistências térmicas superficiais encontram-se apresentados no quadro 7.10 em função da posição do elemento construtivo e do sentido do fluxo de calor.

No quadro 7.6, apresentado anteriormente, encontram-se tabeladas as condutibilidades térmicas (?) dos materiais de construção que compõem as soluções construtivas analisadas.

A resistência térmica dos espaços de ar não ventilados (R_{ar}) depende da sua espessura e encontra-se definida no quadro 7.11, em função da posição do elemento construtivo, espessura do espaço de ar e do sentido do fluxo de calor.

Quadro 7.10 – Resistências térmicas superficiais (fonte: Santos *et al*, 1990)

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial ($m^2.^oC/W$)	
	Exterior ($1/h_e$)	**Interior** ($1/h_i$)
Horizontal (*)	0,04	0,12
Vertical (**)		
Ascendente	0,04	0,10
Descendente	0,04	0,17

(*) – Paredes
(**) – Coberturas e pavimentos

Quadro 7.11 – Resistência térmica dos espaços de ar não ventilados

Sentido do fluxo de calor	Espessura do espaço de ar (mm)	Resistência térmica (R_{ar}) ($m^2.^oC/W$)
Horizontal (*)	10	0.14
	20	0.16
	50 a 100	0.17
Vertical (**) Ascendente	10	0.13
	20	0.14
	50 a 100	0.14
Vertical (**) Descendente	10	0.15
	20	0.18
	50 a 100	0.21

(*) – Paredes
(**) – Coberturas e pavimentos

Nos elementos horizontais – pavimentos –, o isolamento térmico vai ser caracterizado através do coeficiente global médio de transmissão térmica (U_{med}), que resulta da média da soma do coeficiente global de transmissão térmica ascendente com o coeficiente de transmissão térmica descendente.

Quanto menor o valor do coeficiente global de transmissão térmica (U), menores serão as trocas de calor entre as duas faces de um elemento construtivo, o que contribui para a diminuição do consumo de energia convencional nas operações relacionadas com a manutenção das condições de conforto térmico dos espaços habitados.

7.2.3. Parâmetros económicos

Tal como se referiu no capítulo 3.2.2.6 o custo de construção/aquisição é, na maior parte das vezes e erradamente, o aspecto que mais influencia a opção por uma determinada solução construtiva. A análise económica de uma solução construtiva não deve abordar apenas o custo de construção mas todos os custos relacionados com o seu ciclo de vida, pois pequenos acréscimos no investimento inicial podem resultar em poupanças significativas ao nível dos custos de operação e manutenção.

O custo de construção não deve por si só influenciar a decisão, mas em conjunto com a análise de outros parâmetros, nomeadamente ambientais e funcionais, pode constituir um critério de desempate. Também é preciso não esquecer que existem no mercado certas tecnologias construtivas que, apesar de estarem associadas a um investimento inicial superior ao das tecnologias utilizadas correntemente, não apresentam quaisquer vantagens funcionais ou económicas – nas restantes fases do ciclo de vida.

De modo a relacionar o desempenho ambiental e as características funcionais com o custo de construção e a comparar as diversas soluções construtivas a este nível, decidiu-se estimar, para cada solução construtiva, o custo de construção associado, pelo que este será o único parâmetro económico avaliado neste estudo.

Os custos de construção apresentam-se neste trabalho por unidade de superfície de solução construtiva. O custo de cada solução foi estimado através da média de valores obtidos para o preço unitário de cada artigo de construção, numa sondagem realizada a algumas empresas de construção com sede no distrito de Braga. Os custos apresentados espelham a realidade do mercado da construção nessa zona do país durante o ano de 2003.

CAPÍTULO 8

ANALISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA PAVIMENTOS

8.1. Critérios adoptados na definição das soluções construtivas

Depois de se analisarem as soluções construtivas dos pavimentos de alguns edifícios construídos no Norte do país, nomeadamente nos distritos do Porto e de Braga, verificou-se a preponderância da solução construtiva composta por vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem. Assim, no presente estudo, esta solução construtiva foi considerada a solução de referência para os pavimentos.

Os pavimentos apresentam uma importante função estrutural, pois são responsáveis pela distribuição das acções a que estão sujeitos pelas vigas ou directamente pelos elementos estruturais verticais. Tendo em conta a sua importante função estrutural, o comportamento mecânico foi o critério adoptado para a definição das soluções construtivas estudadas: todas as soluções construtivas de pavimentos foram definidas de modo a que fossem compatíveis com os esforços que se desenvolvem num vão de 6m devido às acções correntes nos pavimentos de um edifício de habitação (quadro 8.1).

Quadro 8.1 – Acções consideradas no dimensionamento das soluções construtivas para pavimentos

Acção	Valor (kN/m^2)
Peso próprio	Depende da solução
Peso dos revestimentos	1,00
Paredes divisórias	1,50
Sobrecarga	2,00

8.2. Tecnologias construtivas analisadas

Os pavimentos representam o elemento estrutural que suporta todos os esforços que são aplicados num piso, e constituem o elemento de separação horizontal entre dois andares. Este elemento construtivo pode assumir duas funções distintas: para os locais que se encontram por baixo, assume a função de tecto, e para os locais por cima, serve de piso de suporte.

Neste elemento construtivo é possível identificar três diferentes partes constituintes:

(i) **Elementos de suporte:** vigotas prefabricadas de betão pré-esforçado, painéis alveolares de betão pré-esforçado, vigas metálicas, vigas de madeira, vigas prefabricadas de betão armado ou pré-esforçado, assim como as lajes maciças ou nervuradas de betão armado, entre outros;

(ii) **Revestimento superior:** que constitui o acabamento do pavimento e que descansa sobre a armação ou estrutura de suporte: lajeado, soalho de madeira, revestimentos sintéticos, entre outros;

(iii) **Revestimento inferior:** executado por baixo dos elementos de suporte e que pode ser rebocado, estucado com gesso ou revestido com placas prefabricadas de materiais de todos os tipos.

Neste trabalho foram estudados cinco tipos distintos de tecnologias construtivas para pavimentos, cujas diferenças residem fundamentalmente ao nível da parte encarregada pelo suporte:

(i) **Pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem**;

(ii) **Pavimentos em laje maciça de betão armado**;

(iii) **Pavimentos em painéis alveolares prefabricados de betão pré-esforçado**;

(iv) **Pavimentos mistos com cofragem metálica colaborante**;

(v) **Pavimentos em madeira**.

Dentro de cada tipo de tecnologia construtiva, à excepção dos pavimentos de madeira, a metodologia MARS-SC foi aplicada a três soluções possíveis: na primeira só foi considerada a parte encarregada pelo suporte do pavimento, sem qualquer tipo de isolante; na segunda, numa tentativa de melhorar o isolamento térmico e o comportamento sonoro do pavimento a sons de condução aérea, considera-se a existência de um tecto falso com isolante no tardoz; por último, de modo a melhorar o comportamento sonoro aos sons de percussão, introduziu-se na solução anterior uma lajeta flutuante.

O **tecto falso**, integrado em cada tecnologia construtiva, encontra-se desligado rigidamente da laje e separado desta por uma caixa-de-ar com 15 cm de espessura. O tecto falso é composto pelas seguintes camadas:

(i) Revestimento em placas de gesso cartonado com 1,25 cm de espessura;

(ii) Manta de lã de rocha, com densidade de 40 kg/m^3 e espessura de 2,5 cm, assente no tardoz das placas de gesso cartonado.

A **lajeta flutuante** é materializada, pelas seguintes camadas:

(i) Espuma de polietileno em folha com densidade de 32 kg/m^3 e 0,3 cm de espessura;

(ii) Aglomerado negro de cortiça com densidade de 140 kg/m^3 e 4 cm de espessura;

(iii) Lajeta de betão de argila expandida com densidade de 750 kg/m^3 e 4 cm de espessura.

Nos pavimentos de madeira, aplicou-se a metodologia MARS-SC a quatro soluções construtivas em que o comportamento acústico, a sons de condução aérea e de percussão, já tinha sido avaliado experimentalmente. Os resultados dessa avaliação experimental foram publicados por Martin (1995). A informação obtida experimentalmente é complementada com os parâmetros quantificados numericamente no presente trabalho.

De seguida, realiza-se uma breve apresentação de cada tecnologia construtiva, acompanhada pela representação gráfica de cada solução estudada. A marcha de cálculo encontra-se descrita no Anexo I e os resultados obtidos apresentam-se no quadro 8.3.

8.2.1. Pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem

8.2.1.1. Apresentação da tecnologia construtiva

Este tipo de pavimento é aquele que assume, devido à sua utilização intensiva, maior relevância no contexto da construção portuguesa. Esta tecnologia é essencialmente constituída por vigotas de betão pré-esforçado e blocos de cofragem apoiados lateralmente sobre estas, formando um conjunto que é solidarizado por uma camada contínua de betão complementar executada “in situ” com função resistente.

Pela sua constituição e garantia de ligação eficiente das vigotas ao betão complementar, esta tecnologia de pavimentos pode considerar-se comparável, sob o ponto de vista de funcionamento estrutural, a uma laje com armadura resistente numa só direcção.

Existem vários tipos de blocos de cofragem, variando nas dimensões e no tipo de material (tijolo vazado, poliestireno expandido - EPS, cortiça, betão de argila expandida, etc). A integração de elementos vazados na sua constituição traduz-se, em relação a uma laje maciça com a mesma massa, num melhor comportamento térmico e acústico. A utilização de blocos de cofragem de materiais isolantes – como o EPS ou a cortiça – permite melhorar o comportamento térmico das soluções, piorando, no entanto, a inércia térmica e a estabilidade ao fogo.

Este tipo de tecnologia apresenta tradicionalmente elevada massa por unidade de superfície, ainda que, para um vão com as mesmas dimensões e acções, seja menor do que as lajes de betão armado; e elevada PEC. Apresenta também uma levada contribuição para a inércia térmica dos edifícios.

A durabilidade é bastante elevada mas o potencial de reutilização é nulo. A reciclagem é possível. No entanto, a sua constituição heterogénea torna este processo complexo.

Na figura 8.1, apresenta-se o aspecto de um pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem, antes da colocação do betão complementar.

Figura 8.1 – Aspecto de um pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem, antes da colocação do betão complementar

8.2.1.2. Descrição das soluções construtivas

O pavimento foi dimensionado através do programa de cálculo de um fabricante, de modo a que se verificasse a segurança aos estados limites últimos e de utilização. Deste modo, é necessário um pavimento do tipo 2V5 – C40x21-25, isto é, um pavimento de dupla vigota, com altura total de 25 cm e camada de betão complementar – com 4 cm de espessura – armada com armadura de distribuição em rede electrossoldada A50. Os blocos de cofragem são cerâmicos e apresentam três fiadas de furos.

Nas figuras 8.2 a 8.4, representam-se graficamente as três soluções construtivas analisadas. As características do tecto falso e da lajeta flutuante encontram-se descritas em 8.2.

1) Pavimento sem isolante – solução construtiva de referência (Pav1)

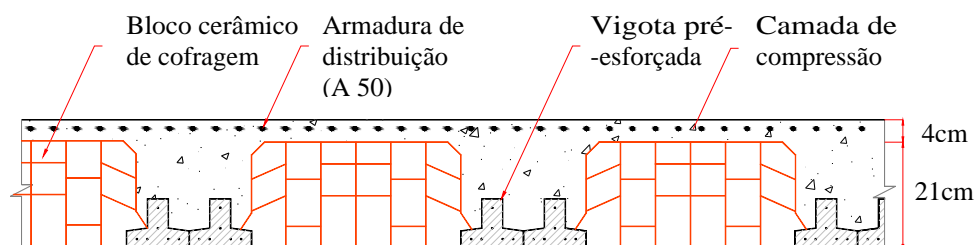



Figura 8.2 – Pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem, sem isolante (Pav1 - solução de referência)

2) Pavimento com tecto falso e isolante (Pav2)

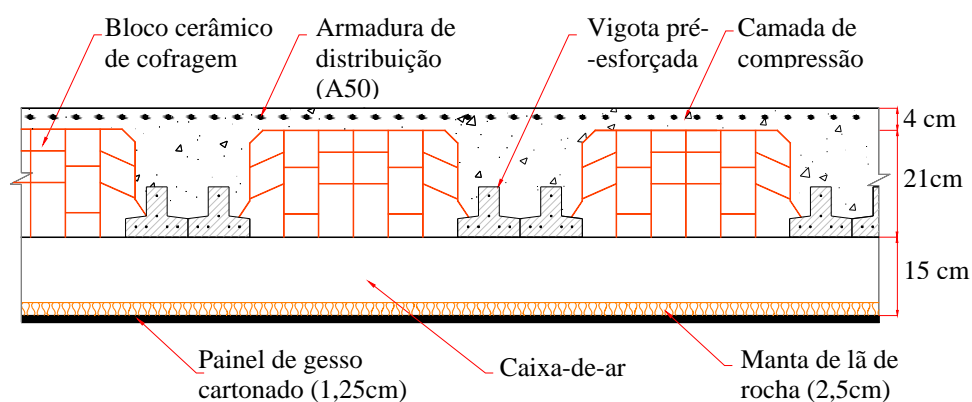



Figura 8.3 – Pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem, com tecto falso e isolante no tardoz (Pav2)

3) Pavimento com isolante térmico, tecto falso e lajeta flutuante (Pav3)

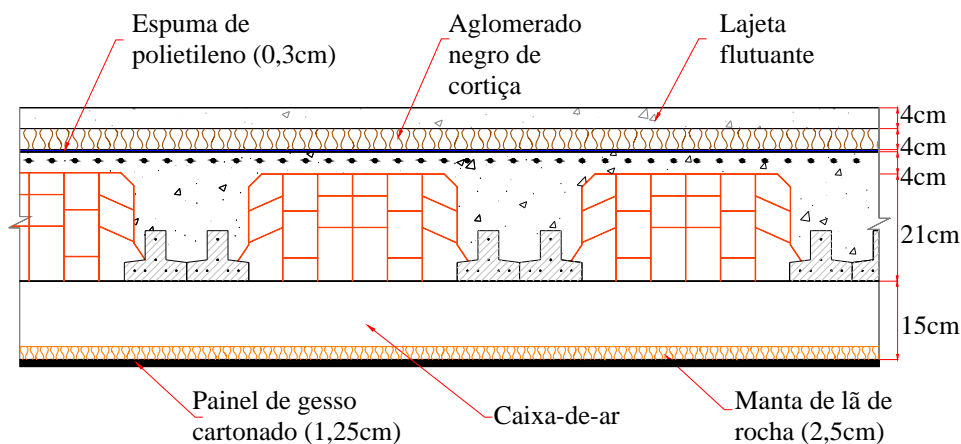



Figura 8.4 – Pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem com tecto falso, isolante e lajeta flutuante (Pav3)

8.2.2. Pavimentos de estrutura contínua em laje maciça de betão armado

8.2.2.1. Apresentação da tecnologia construtiva

As lajes maciças são fabricadas inteiramente em obra, requerendo uma grande quantidade de trabalho de cofragem e, por conseguinte, grande carga de mão-de-obra. Este tipo de laje apresenta espessura constante e pode ser armado numa só direcção ou em duas direcções ortogonais.

Esta tecnologia construtiva apresenta as vantagens de ser um dos sistemas mais económicos no caso de vãos de pequena dimensão e de não requerer mão-de-obra com elevado grau de qualificação. Em contrapartida, apresenta como principais desvantagens a sua elevada massa e a dificuldade em permitir a passagem de instalações.

A considerável massa do betão oferece uma boa inércia térmica e elevado isolamento a ruídos de condução aérea, prejudicando, no entanto, o seu comportamento térmico, por condução. Assim, quando este tipo de pavimento se encontra numa das envolventes de um edifício é necessário introduzirem-se revestimentos isolantes de maior espessura do que nas lajes aligeiradas.

A nível ambiental o seu desempenho é prejudicado fundamentalmente pela sua elevada massa. O betão armado apresenta tradicionalmente grande quantidade de energia primária. Esta energia pode, no entanto, ser reduzida se se utilizarem armaduras e/ou agregados reciclados. A grande quantidade de trabalho de cofragens e a necessidade de se utilizar grande quantidade de óleos descofrantes, potenciam os impactes ambientais durante a fase de construção. Apesar do seu ciclo de vida ser dilatado – quando não exposta aos agentes atmosféricos –, no final, o processo

de desmantelamento/demolição é complexo e o potencial de reutilização é nulo. A reciclagem é possível, embora o processo envolva grande consumo energético.

Apesar das reservas enunciadas, a elevada inércia térmica torna esta tecnologia adequada a sistemas de construção que recorram a soluções construtivas de baixa massa para as paredes. Nesse caso, os pavimentos asseguram a massa necessária à acumulação de calor, evitando grandes flutuações na temperatura nos espaços habitados, reduzindo o consumo energético convencional nas operações de aquecimento e arrefecimento, e aumentando o conforto.

Na figura 8.5, apresenta-se o aspecto de uma laje maciça numa das etapas da fase de construção.

Figura 8.5 – Aspecto de uma laje maciça durante a fase de construção (antes da betonagem)

8.2.2.2. Descrição das soluções construtivas

A laje foi dimensionada de acordo com a metodologia preconizada pelo Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado, apresentando uma altura total de 20 cm.

Nas figuras 8.6 a 8.8, representam-se graficamente as três soluções construtivas analisadas. As características do tecto falso e da lajeta flutuante encontram-se descritas em 8.2.

1) Pavimento sem isolante (Pav4)

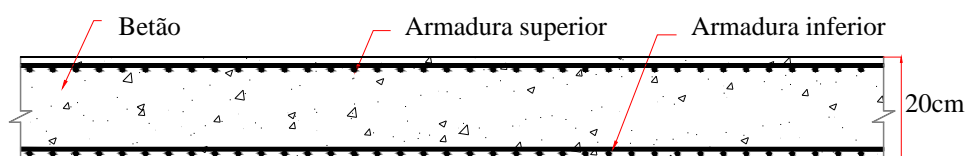



Figura 8.6 – Pavimento de estrutura contínua em laje maciça de betão armado sem isolante (Pav4)

2) Pavimento com tecto falso e isolante (Pav5)

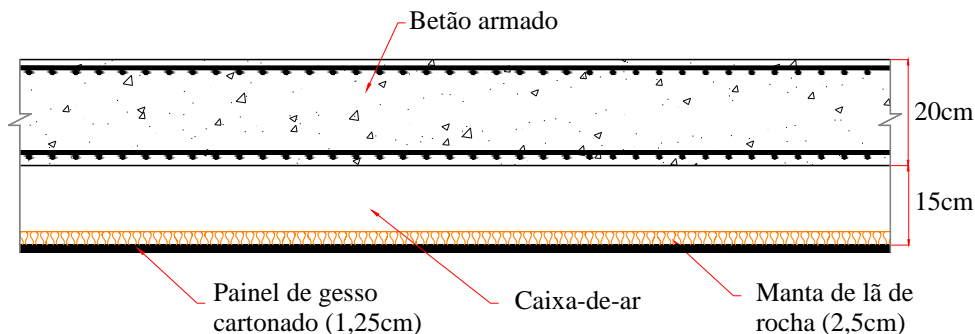



Figura 8.7 – Pavimento de estrutura contínua em laje maciça de betão armado com tecto falso e isolante no tardoz (Pav5)

3) Pavimento com tecto falso, isolante e lajeta flutuante (Pav6)

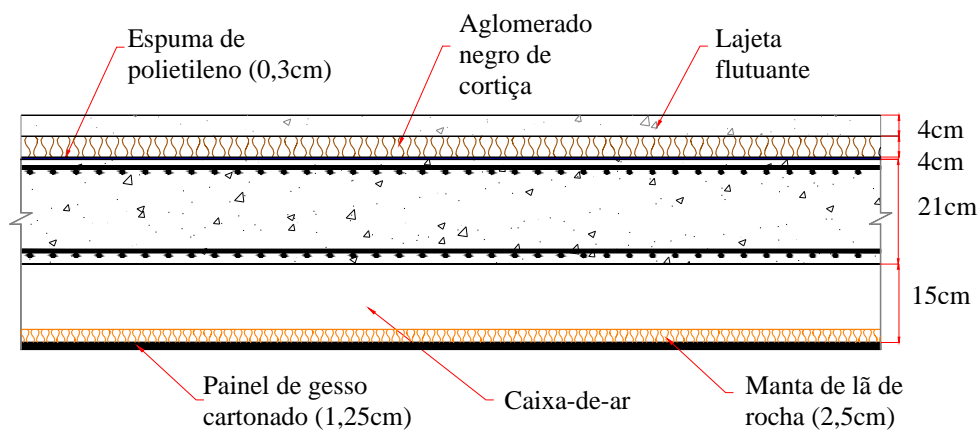



Figura 8.8 – Pavimento de estrutura contínua em laje maciça de betão armado com tecto falso, isolante e lajeta flutuante (Pav6)

8.2.3. Pavimentos de painéis alveolares prefabricados de betão pré-esforçado

8.2.3.1. Apresentação da tecnologia construtiva

Neste tipo de tecnologia, os pavimentos são compostos por painéis alveolares prefabricados de betão pré-esforçado, dispostos lado a lado, deixando entre si espaços livres – juntas – cujo preenchimento é realizado em obra, com betão de solidarização. Quando se pretende maior resistência é possível a realização de uma camada contínua de betão armado – betão complementar – sobre a superfície do pavimento. O seu comportamento estrutural é semelhante ao de uma laje com armadura resistente unidireccional. Esta tecnologia surgiu na procura de soluções com maior grau de industrialização, que permitissem a diminuição dos prazos de construção e a utilização de menores quantidades de mão-de-obra na fase de construção

Relativamente às vantagens desta tecnologia é de salientar que, relativamente aos pavimentos de lajes maciças de betão armado, em igualdade de vãos e de sobrecargas, possuem menor peso próprio, o que permite o aligeiramento das estruturas de suporte de cargas verticais dos edifícios. Outra vantagem é que dispensa o uso de cofragens e de escoramentos intermédios. Por ser constituída por elementos vazados, confere melhor isolamento térmico entre andares do que as lajes maciças.

Como reservas, é de salientar o mau comportamento ao fogo e a dificuldade que existe na implantação e cruzamento de instalações

A nível ambiental, o seu desempenho é melhor do que o das lajes maciças, pois apresenta menor massa e, por conseguinte, menor quantidade de energia incorporada. A utilização de menor quantidade de aço também contribui para este aspecto. O seu desmantelamento é mais simples do que nas tecnologias referidas anteriormente, e a reutilização dos painéis é possível, principalmente quando não existe camada de betão complementar.

Nas figuras 8.9 e 8.10 apresentam-se duas fases do processo construtivo.

Figura 8.9 – Transporte de lajes alveolares

Figura 8.10 – Aplicação de lajes alveolares

8.2.3.2. Descrição das soluções construtivas

Para o seu dimensionamento estrutural, recorreu-se a um ábaco apresentado nas especificações técnicas de um fabricante. Em função do vão e das acções será necessário um pavimento com 20 cm de altura total, composto por painéis alveolares com 16 cm de altura e camada de betão complementar de 4 cm.

Nas figuras 8.11 a 8.13, representam-se graficamente as três soluções construtivas analisadas. As características do tecto falso e da lajeta flutuante encontram-se descritas em 8.2.

1) Pavimento sem isolante (Pav7)

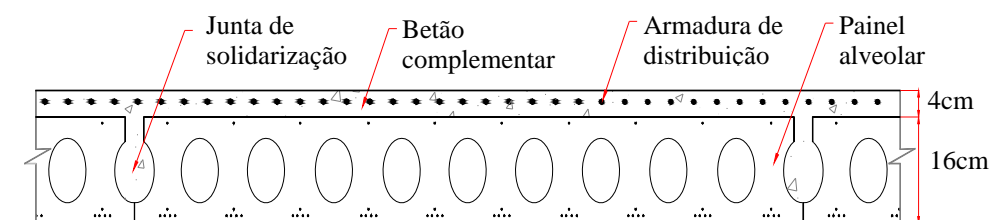



Figura 8.11 – Pavimento de painéis alveolares sem isolante térmico (Pav7)

2) Pavimento com tecto falso e isolante (Pav8)

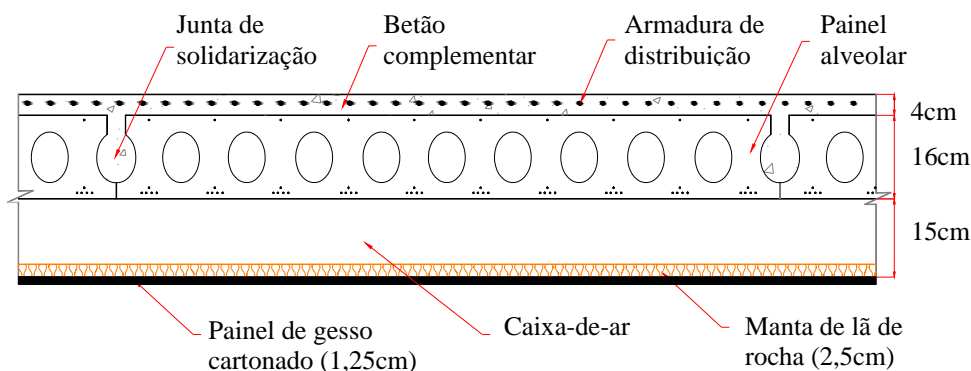



Figura 8.12 – Pavimento em painéis alveolares com tecto falso e isolante térmico no tardoz (Pav8)

3) Pavimento com tecto falso, isolante e lajeta flutuante (Pav9)

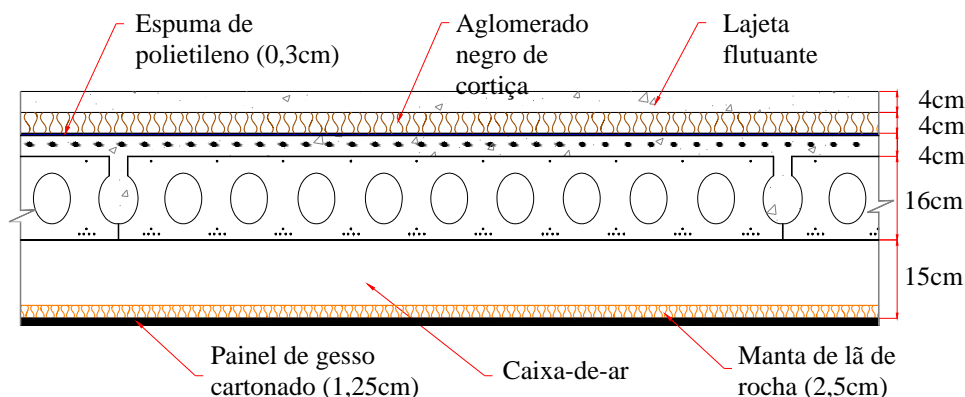



Figura 8.13 – Pavimento em painéis alveolares com tecto falso, isolante térmico e lajeta flutuante (Pav9)

8.2.4. Pavimentos mistos com cofragem metálica colaborante

8.2.4.1. Apresentação da tecnologia construtiva

Este tipo de pavimento, tal como no anterior, teve origem na procura de soluções construtivas com maior grau de industrialização. Esta tecnologia é composta por chapas metálicas onduladas – assentes geralmente em vigas de aço laminado –, sobre as quais se realiza uma camada de betão armado – camada complementar (fig. 8.14 e 8.15).

As chapas metálicas actuam como cofragem perdida e como armadura de momentos positivos. Evitam-se assim, os morosos processos de desmontagem e manutenção das cofragens, muito característico no caso das lajes maciças.

Com esta tecnologia é possível, em igualdade de vãos e de sobrecargas, realizarem-se pavimentos com menor espessura do que a dos pavimentos com laje contínua de betão armado ou de vigotas pré-esforçadas e blocos de cofragem. A sua massa é assim menor do que a dos pavimentos convencionais, o que torna esta tecnologia adequada a locais onde a distância de transporte dos materiais/produtos é significativa. O tempo necessário à sua construção e a quantidade de mão-de-obra necessária são também menores do que nos pavimentos convencionais.

O potencial de reutilização é praticamente nulo, pois só se conseguem reaproveitar as vigas metálicas que suportam o pavimento. O elevado grau de ligação entre as chapas metálicas e a camada de betão tornam os processos de reciclagem complexos e dispendiosos.

Para mais informações acerca tecnologia construtiva, bem como do sistema construtivo a que está correntemente associada, consultar o capítulo 5.2.

Figura 8.14 – Aspecto da face inferior – tecto – de um pavimento misto de cofragem metálica colaborante

Figura 8.15 – Aspecto da face superior de um pavimento de cofragem metálica colaborante durante a fase de construção – antes da betonagem

8.2.4.2. Descrição das soluções construtivas

De acordo com o vão, sobrecargas em causa e com as características técnicas apresentadas por um fabricante de componentes para este tipo de tecnologia, será necessário que o pavimento seja constituído por chapa colaborante com 0,75 mm de espessura e peso próprio de 8,51 kg/m^2, sobre a qual assentará uma camada de betão armado – betão complementar – com 10 cm de espessura máxima. Atendendo às características mecânicas da chapa e às acções actuantes, será necessário que estrutura principal das soluções construtivas seja constituída por perfis de aço laminado INP 160, espaçados, no máximo, de 1 m.

Nas figuras 8.16 a 8.18, representam-se graficamente as três soluções construtivas analisadas. As características do tecto falso e da lajeta flutuante encontram-se descritas em 8.2.

1) Pavimento sem isolante (Pav10)

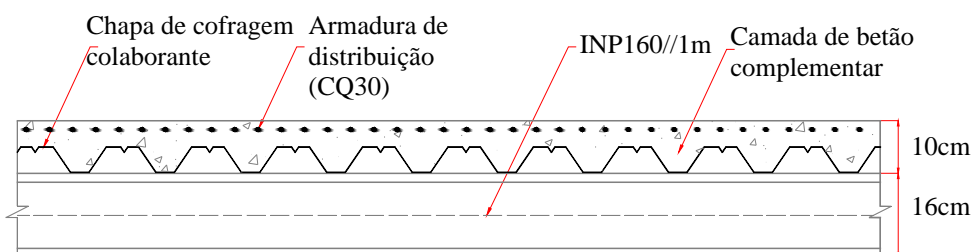



Figura 8.16 – Pavimento misto de cofragem metálica colaborante sem isolante térmico (Pav10)

2) Pavimento com tecto falso e isolante (Pav11)

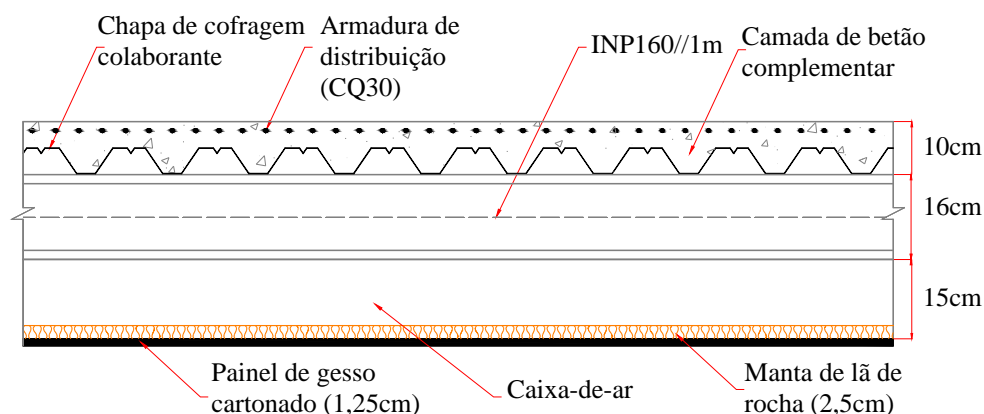



Figura 8.17 – Pavimento misto de cofragem metálica colaborante com tecto falso e isolante térmico (Pav11)

3) Pavimento com tecto falso, isolante e lajeta flutuante (Pav12)

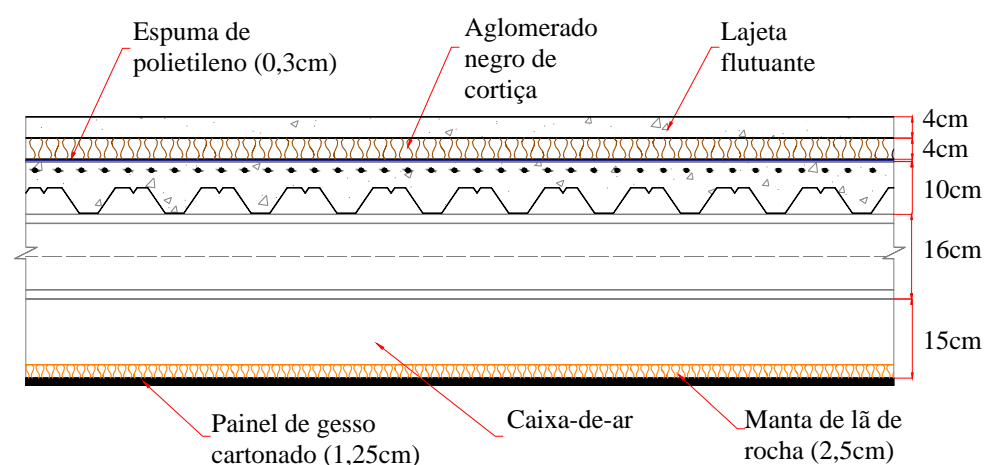



Figura 8.18 – Pavimento misto de cofragem metálica colaborante com tecto falso, isolante térmico e lajeta flutuante (Pav12)

8.2.5. Pavimentos de estrutura descontínua em madeira

8.2.5.1. Apresentação da tecnologia construtiva

Antes do aparecimento do betão armado, esta era praticamente a única tecnologia de pavimentos existente em Portugal. Actualmente, só muito raramente se recorre a este tipo de tecnologia, pois

as lajes de betão armado ou de elementos metálicos prestam-se melhor às exigências mecânicas pretendidas.

Este tipo de tecnologia possui a grande vantagem de ser bastante mais leve do que as restantes tecnologias construtivas. A baixa massa torna este tipo de pavimentos adequado a locais em que a distância de transporte dos materiais e componentes de construção é elevada.

Os pavimentos de madeira apresentam baixa energia primária incorporada e baixa inércia térmica. A sua baixa inércia térmica poderá, sempre que necessário, ser compensada pela sua utilização em conjunto com outras tecnologias construtivas mais pesadas.

A madeira, desde que tenha origem em plantações sustentáveis – doutra forma o impacte na biodiversidade será elevado –, é um dos materiais de construção com menor impacte ambiental. Também é preciso ter em atenção os compostos químicos utilizados para a sua preservação que, em alguns casos, podem comprometer a qualidade do ar interior (consultar o capítulo 3.2.2.5).

O revestimento deste tipo de pavimentos é geralmente descontínuo, podendo constituir uma fonte de infiltração de ar. Para que não se comprometa os seus comportamentos térmico e acústico deve-se assegurar um adequado encaixe entre os diversos componentes.

A sua durabilidade pode ser elevada, desde que devidamente protegida contra os microorganismos e da humidade. As ligações entre os diversos componentes são mecânicas, o que torna possível o processo de desconstrução e elevado o potencial de reutilização.

Na figura 8.19, apresenta-se o aspecto de um pavimento de estrutura descontínua em madeira.

Figura 8.19 – Aspecto inferior de um pavimento de estrutura descontínua em madeira

8.2.5.2. Descrição das soluções construtivas

Este tipo de pavimento foi dimensionado de acordo com a metodologia proposta pelo Eurocódigo 5, tendo-se admitido a utilização de peças de madeira da classe C24 ($f_{m,k}$[1] = 24 Mpa). O vigamento das soluções construtivas é composto por elementos em madeira de secção 0,25x0,30 m, afastados entre si de 0,65 m.

Tendo como base o estudo referido anteriormente, foram analisadas quatro soluções construtivas, cujas diferenças se verificam ao nível do revestimento de piso e do revestimento de tecto:

(i) Pavimento de estrutura descontínua em madeira sem isolante térmico, composto por piso em madeira (1,80 cm) e tecto revestido com painéis de gesso cartonado (1,25 cm) (fig. 8.20).

(ii) Pavimento de estrutura descontínua em madeira, com piso em madeira (1,80 cm), tecto falso composto por dois níveis de painéis de gesso cartonado (2x1,25 cm) e manta de lã de rocha (8 cm) aplicada no tardoz do tecto (fig. 8.21)

(iii) Pavimento de estrutura descontínua em madeira, com revestimento de piso flutuante sobre revestimento estrutural em madeira (1,80 cm), tecto revestido com painéis de gesso cartonado (1,25 cm) e manta de lã de rocha (8 cm) aplicada no tardoz do tecto (fig. 8.22).

(iv) Pavimento de estrutura descontínua em madeira, com piso flutuante em madeira (1,80 cm), tecto revestido com painéis de gesso cartonado (1,25 cm) e manta de lã de rocha (8 cm) aplicada no tardoz do tecto (fig. 8.23).

É de salientar que no estudo publicado por Martin (1995), o comportamento sonoro foi avaliado em pavimentos em que a altura das vigas era de 20 cm. Atendendo à maior altura das vigas – 30 cm – dos pavimentos estudados neste documento, é possível que estes apresentem na realidade melhor comportamento sonoro.

---

[1] Valor característico da resistência à flexão.

1) Pavimento sem isolante (Pav13)

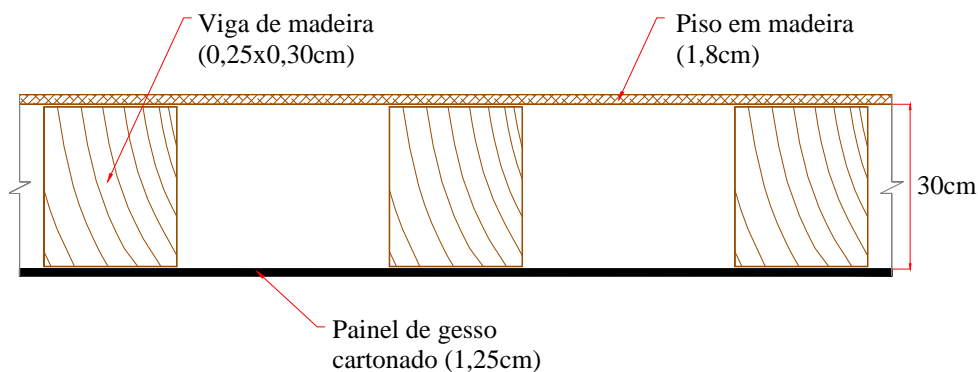



Figura 8.19 – Pavimento de estrutura descontínua em madeira sem isolante (Pav13)

2) Pavimento com tecto falso e isolante (Pav14)

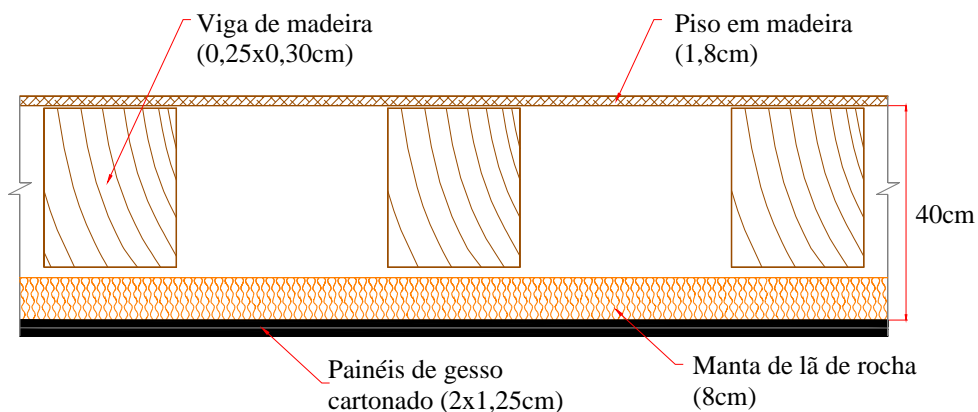



Figura 8.20 – Pavimento de estrutura descontínua em madeira com tecto falso e isolante (Pav14)

3) Pavimento com isolante e piso flutuante sobre revestimento estrutural (Pav15)

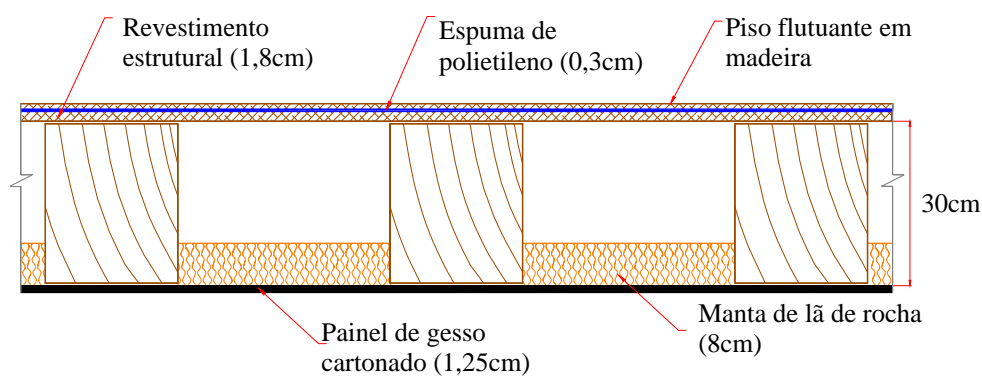



Figura 8.21 – Pavimento de estrutura descontínua em madeira com isolante e piso flutuante sobre revestimento estrutural (Pav15)

4) Pavimento com isolante e piso flutuante (Pav16)

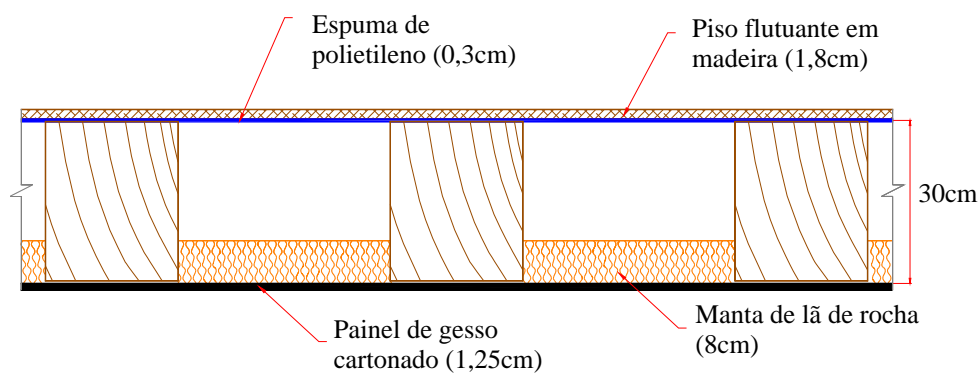
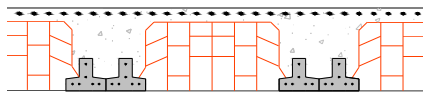
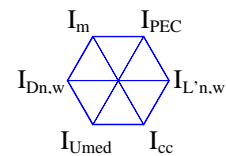
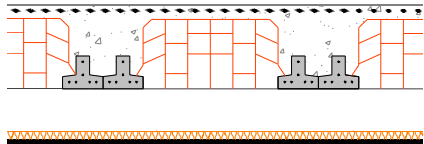
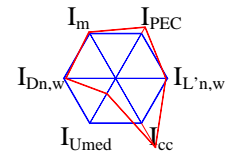
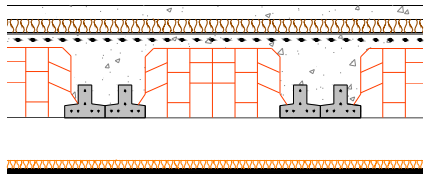
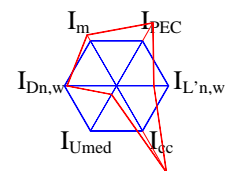
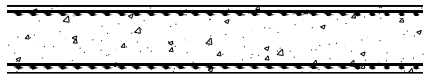
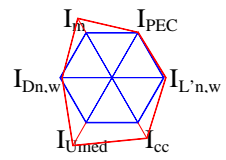
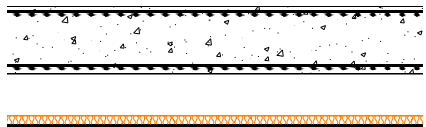
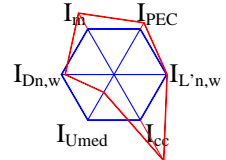
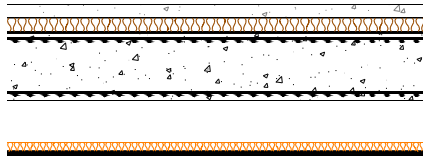
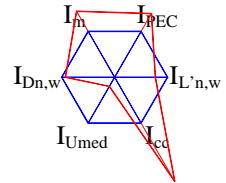
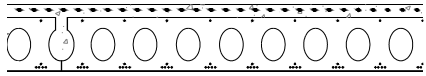
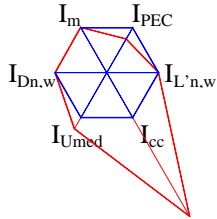
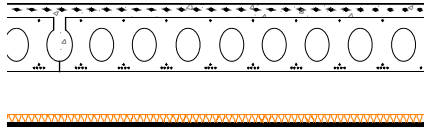
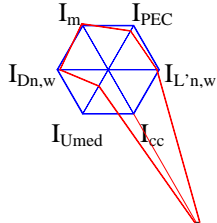
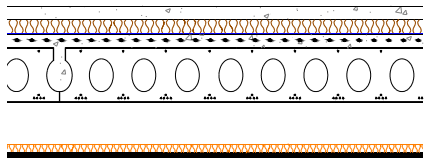
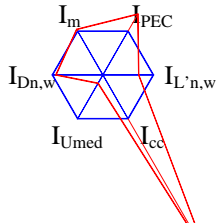
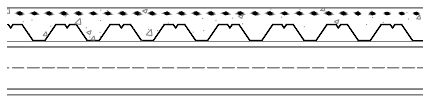
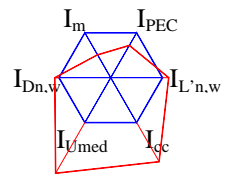
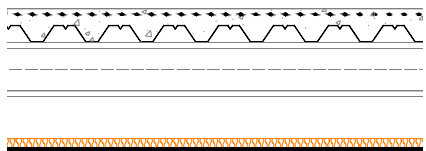
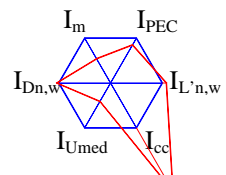
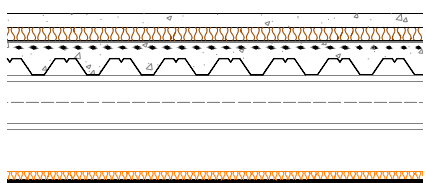
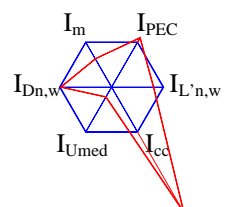
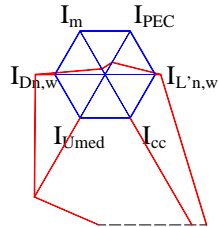
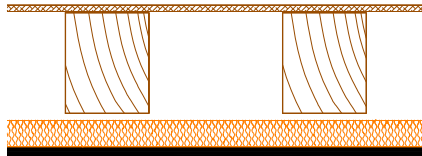
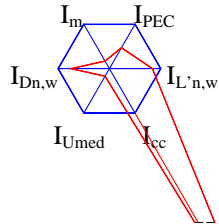
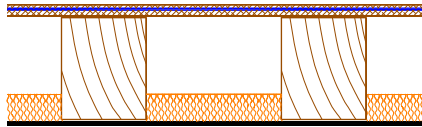
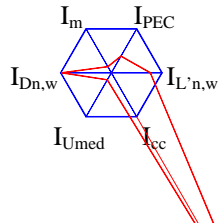



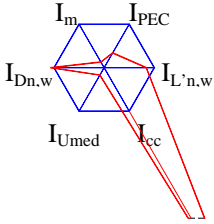
Figura 8.22 – Pavimento de estrutura descontínua em madeira com isolante e piso flutuante

8.3. Resultados obtidos

Os resultados obtidos encontram-se apresentados no quadro 8.2.

Quadro 8.2 – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva	Massa (kg/m^2)	PEC (kW.h/m^2)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m^2.ºC)	Custo (€/m^2)	Perfil sustentável
Pav1 (referência) - descrição em 8.2.1	373	163	53	75	2,35	35,45	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav2 – descrição em 8.2.1	385	186	55	73	0,80	54,45	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav3 – descrição em 8.2.1	421	227	56	54	0,45	68,00	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}

Quadro 8.2 (cont.) – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva	Massa (kg/m^2)	PEC (kW.h/m^2)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m^2.ºC)	Custo (€/m^2)	Perfil sustentável
Pav4 – descrição em 8.2.2	491	164	55	78	3,50	47,90	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav5 – descrição em 8.2.2	503	185	57	76	0,90	66,90	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav6 – descrição em 8.2.2	539	227	57	58	0,45	80,50	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}

Quadro 8.2 (cont.) – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva	Massa (kg/m^2)	PEC (kW.h/m^2)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m^2.ºC)	Custo (€/m^2)	Perfil sustentável
Pav7 – descrição em 8.2.3	377	122	53	75	2,89	113,50	
Pav8 – descrição em 8.2.3	389	144	56	72	0,85	132,50	
Pav9 – descrição em 8.2.3	425	185	57	53	0,45	146,10	

Quadro 8.2 (cont.) – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva	Massa (kg/m²)	PEC (kW.h/m²)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m².ºC)	Custo (€/m²)	Perfil sustentável
Pav10 – descrição em 8.2.4	188	117	49	84	4,95	66,45	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav11 – descrição em 8.2.4	200	138	52	81	0,95	85,45	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav12 – descrição em 8.2.4	236	180	54	61	0,50	99,05	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}

Quadro 8.2 (cont.) – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva Descrição	Massa (kg/m^2)	PEC (kW.h/m^2)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m^2.ºC)	Custo (€/m^2)	Perfil sustentável
Pav13 – descrição em 8.2.5	48	46	38	83	1,90	166,80	
Pav14 – descrição em 8.2.5	62	76	63	56	0,39	199,20	
Pav15 – descrição em 8.2.5	52	57	54	58	0,37	199,25	

Quadro 8.2 (cont.) – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva	Massa (kg/m^2)	PEC (kW.h/m^2)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m^2.ºC)	Custo (€/m^2)	Perfil sustentável
Pav16 – descrição em 8.2.5	50	56	50	63	0,40	181,75	I_m, I_{PEC}, $I_{Dn,w}$, $I_{L'n,w}$, I_{Umed}, I_{cc}

8.4. Discussão dos resultados

Em primeiro lugar, é necessário salientar que a interpretação dos resultados obtidos não pode ser alienada do conjunto de exigências funcionais que se pretende para determinado pavimento. Por exemplo, num pavimento interior, que divida dois espaços aquecidos pertencentes a um mesmo fogo, não é exigido que este satisfaça qualquer requisito térmico, o que alteraria significativamente as conclusões descritas seguidamente. O mesmo poderia ocorrer ao nível das exigências para o isolamento sonoro. Assim, os resultados obtidos serão discutidos admitindo que se pretende que o pavimento a seleccionar apresente bom isolamento sonoro, bom isolamento térmico, bom desempenho ambiental, sem que com isso se comprometa o custo de construção.

Analisando os resultados obtidos na aplicação da metodologia MARS-SC às seis soluções construtivas para pavimentos, verifica-se que, dentro desta amostra e de acordo com os parâmetros analisados, a **solução construtiva mais sustentável é a Pav12** – pavimento misto com cofragem metálica colaborante, com tecto falso, isolante e lajeta flutuante –, enquanto que a **solução construtiva menos sustentável é a Pav13** – pavimento de estrutura descontínua em madeira com tecto falso sem isolante.

No quadro 8.3, apresentam-se as soluções construtivas ordenadas por ordem decrescente de sustentabilidade.

Como se pode verificar nos resultados obtidos, a **aplicação do tecto falso**, com as características referidas anteriormente, melhora significativamente o isolamento térmico das tecnologias construtivas, sem comprometer o desempenho ambiental e o custo de construção. A melhoria é tanto maior quanto menor for o isolamento térmico da solução sem tecto falso. Por exemplo, no caso das lajes com cofragem metálica colaborante, o valor do coeficiente de transmissão térmica na solução com tecto falso é cerca de 20% do valor da solução sem tecto falso. As melhorias verificadas ao nível do isolamento sonoro a sons de condução área, após a introdução do tecto falso, rondam em média os 2 dB.

A **aplicação da lajeta flutuante**, com as características referidas anteriormente, traduz-se numa melhoria significativa – como era de esperar – ao nível do isolamento sonoro a sons de percussão, sem que com isso seja necessário aumentar desmesuradamente o investimento inicial. O isolamento térmico das tecnologias construtivas também melhora, em grande parte devido à baixa condutibilidade térmica do elemento resiliente – aglomerado negro de cortiça. Em contrapartida, a aplicação da lajeta flutuante implica – principalmente nas tecnologias construtivas de menor massa – uma diminuição significativa do desempenho ambiental. A título de exemplo, a aplicação de lajeta flutuante no pavimento com cofragem metálica colaborante traduz-se num incremento da massa e da energia primária incorporada em cerca de 25% e 55%, respectivamente.

A opção pelos **pavimentos de estrutura contínua de betão armado**, em detrimento das lajes de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem, não apresenta qualquer vantagem, tendo

em conta os parâmetros analisados. Neste caso, a inexistência de elementos vazados agrava significativamente a sua massa e diminui acentuadamente o isolamento térmico.

Quadro 8.3 – Soluções construtivas para pavimentos, ordenadas por ordem decrescente de sustentabilidade

Posição	Solução construtiva	
1º	Pav12	Mais sustentável
2º	Pav14	↑
3º	Pav2	
4º	Pav16	
5º	Pav11	
6º	Pav15	
7º	Pav3	
8º	Pav1	
9º	Pav5	
10º	Pav6	
11º	Pav8	
12º	Pav4	
13º	Pav9	
14º	Pav10	
15º	Pav7	
16º	Pav13	Menos sustentável

Os **pavimentos constituídos por painéis prefabricados de betão pré-esforçado** apresentam como única vantagem, relativamente à solução de referência, a menor quantidade – menos cerca de 25% – de energia primária incorporada. A maior desvantagem reside ao nível do custo de construção, que é superior em cerca de 220%. A aplicação desta tecnologia em edifícios de habitação não se traduz em qualquer vantagem. Este tipo de pavimento será mais adequado a edifícios com grandes vãos ou elevadas sobrecargas, como por exemplo, os edifícios industriais. Um parâmetro que não foi analisado neste estudo, e que poderá justificar a opção por esta

tecnologia, é o tempo necessário à construção, que neste caso é menor, pelos motivos apontados anteriormente.

Os **pavimentos mistos com cofragem metálica colaborante apresentam** como principal desvantagem o seu fraco isolamento térmico, que é justificado pela elevada condutibilidade térmica dos materiais constituintes. A sua massa e PEC são significativamente inferiores – em cerca de 50% e 28%, respectivamente, tornando o seu desempenho ambiental melhor do que o da solução de referência. Numa situação em que não seja necessário cumprir a exigência de isolamento térmico, esta tecnologia torna-se mais sustentável do que a de referência. Sempre que necessário, o seu baixo isolamento térmico pode ser facilmente corrigido pela introdução de revestimentos isolantes que, como se pode observar no quadro 8.2, acabam por a converter na tecnologia construtiva mais sustentável, atendendo aos parâmetros considerados. Outra desvantagem reside ao nível do custo de construção que, por ser praticamente o dobro do da solução de referência, constitui uma barreira à sua implementação.

Os **pavimentos de estrutura descontínua em madeira** são, dentro da amostra analisada, os que apresentam melhor desempenho ambiental – a sua massa e energia primária chegam a ser apenas cerca de 15% e 28%, respectivamente, dos valores associados à solução de referência. A solução mais sustentável só não pertence a este tipo de tecnologia devido à necessidade de se realizar um investimento inicial muito significativo, que é, numa das soluções, superior em cerca de 400% relativamente à solução de referência. Dentro desta tecnologia, a solução mais sustentável é a que apresenta tecto falso, desligado rigidamente dos elementos de suporte, com isolante no tardoz – Pav14.

Em conclusão, a **tecnologia construtiva convencional** apresenta, no universo analisado, um bom posicionamento – o Pav2 encontra-se no grupo das três soluções mais sustentáveis –, apresentando como principal vantagem o facto de apresentar o menor custo de construção. No entanto, é preciso não esquecer que existem outros parâmetros que não foram abordados neste estudo – por exemplo o potencial de reutilização –, que poderiam comprometer a sustentabilidade desta solução.

CAPÍTULO 9

ANALISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA PAREDES EXTERIORES

9.1. Critérios adoptados na definição das soluções construtivas

A principal função das paredes exteriores, em conjunto com os pavimentos exteriores e coberturas, consiste em estabelecer uma barreira entre os ambientes exterior e interior, de modo a que o ambiente interior possa ser ajustado e mantido dentro de determinadas condições. Uma parede exterior deve reunir uma série de requisitos: antes de mais deve ser estável e a sua durabilidade deve ser assegurada durante um determinado período de tempo, enquanto que actua como uma barreira para o vento, chuva, radiação solar, calor, ruído, fogo, insectos, animais e até humanos.

A maior parte da área da envolvente exterior dos edifícios corresponde à área das paredes exteriores – fachadas e empenas. É através das paredes exteriores que se processa a maior parte das trocas térmicas entre os ambientes interior e exterior, pelo que o estudo cuidado do comportamento térmico das soluções construtivas, a adoptar na envolvente vertical, é fundamental para que se reduza o consumo de energia nas operações de manutenção do conforto térmico dos ocupantes, com todos os benefícios ambientais daí resultantes.

Tendo em conta a importância do comportamento térmico, relativamente às restantes exigências funcionais dos elementos da envolvente vertical, as soluções construtivas analisadas foram definidas de modo que os seus coeficientes de transmissão térmica fossem, no mínimo semelhantes. Como a definição das propriedades físicas e da espessura dos diversos materiais que compõem as soluções construtivas é condicionada pela sua disponibilidade no mercado, as soluções apresentadas podem não apresentar exactamente o mesmo coeficiente global de transmissão térmica. No entanto, dentro de cada tipo de tecnologia, escolheu-se a solução cujo comportamento mais se assemelha ao da solução de referência.

As soluções construtivas apresentadas possuem um coeficiente de transmissão térmica menor do que os valores máximo admissível e de referência, apresentados no Regulamento das características de Comportamento Térmico dos Edifícios (R.C.C.T.E. – DL 40/90 de 6 de Fevereiro), para cada uma das zonas climáticas e para o caso de elementos pertencentes à envolvente exterior (quadro 9.1).

Quadro 9.1 – Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis e de referência, para elementos pertencentes à envolvente opaca vertical (W/m^2.ºC)

	Zona climática		
	I_1	**I_2**	**I_3**
Coeficiente máximos admissíveis	1,80	1,60	1,45
Coeficientes de referência	1,40	1,20	0,95

Como solução de referência adoptou-se a parede dupla de alvenaria de tijolo vazado com pano exterior de 15 cm e pano interior de 11 cm, separados por caixa-de-ar de 4cm parcialmente preenchida com isolante térmico.

É de assinalar que neste trabalho só foi analisada a parte opaca da envolvente vertical na zona corrente, ignorando-se a potencialidade de cada solução ao nível da correcção das pontes térmicas nas zonas de vãos, vigas, topos de lajes e pilares.

9.2. Tecnologias construtivas analisadas

Neste capítulo foram analisadas seis tecnologias construtivas distintas para paredes exteriores:

(i) **Parede dupla de alvenaria de tijolo vazado;**

(ii) **Parede dupla, com pano exterior em alvenaria de pedra aparelhada e pano interior em alvenaria de tijolo vazado**;

(iii) **Parede simples com reboco armado, sobre isolante contínuo pelo exterior;**

(iv) **Parede dupla, com pano exterior em alvenaria de tijolo maciço com face à vista e pano interior em alvenaria blocos de betão celular autoclavado;**

(v) **Parede ventilada, com elemento de suporte em alvenaria de blocos de betão leve e revestimento cerâmico descontínuo fixado em estrutura metálica;**

(vi) **Parede com estrutura em perfis leves de aço.**

9.2.1. Parede dupla de alvenaria de tijolo vazado

9.2.1.1. Apresentação da tecnologia construtiva

O tijolo vazado começou a ser utilizado, em Portugal, com alguma expressão na construção de paredes exteriores, a partir de meados do século XX. De início, nos anos 50, o tijolo vazado era tradicionalmente utilizado no pano interior de paredes duplas com pano exterior de alvenaria de pedra. A partir dos anos 60 começaram a surgir as primeiras soluções de parede dupla com ambos os panos em alvenaria de tijolo vazado (APICER, 2000).

O tijolo vazado surgiu da necessidade de se aligeirarem as paredes exteriores, dado que a tecnologia utilizada até então – alvenaria de pedra – era pesada, inviabilizado a construção em altura.

As paredes duplas, também denominadas por paredes de panos dobrados, surgiram numa tentativa de se melhorar o comportamento térmico e a protecção contra a humidade nas paredes exteriores.

As paredes duplas, com panos de alvenaria de tijolo vazado, dominam actualmente as soluções de fachada nos edifícios em Portugal, existindo várias variantes que vão desde soluções mais esbeltas e de fraco desempenho – constituídas por pano exterior de 11 cm e interior de 7 cm –, até soluções de maior espessura e com características mais adequadas às suas funções – que em situações muito raras chegam a ser constituídas por pano exterior de 22 cm e interior de 15 cm. Nas paredes duplas, o isolamento térmico é geralmente melhorado através da introdução de isolante em placas ou projectado, preenchendo totalmente ou parcialmente a caixa-de-ar (fig. 9.1).

Relativamente às vantagens desta tecnologia, é de salientar que, apesar de necessitar de grande quantidade de mão-de-obra, esta não tem de ser especializada. Por outro lado, a abundância, em Portugal, da matéria-prima necessária à realização das unidades de alvenaria de tijolo e o elevado número de empresas que "dominam" esta tecnologia, tornam o seu custo menor do que o das demais tecnologias. Quanto ao isolamento térmico, por ser constituída por elementos vazados, esta tecnologia apresenta melhor desempenho do que outras soluções com igual espessura constituídas por elementos maciços.

Quanto às reservas, é de assinalar que a execução de paredes de alvenaria de tijolo está relacionada com a produção de grande quantidade de resíduos, o que é justificado pela elevada fragilidade deste material, pela necessidade de se proceder à realização de remates e de se implantarem instalações. As unidades de alvenaria estão ligadas quimicamente entre si, e entre si e os elementos estruturais, o que torna a sua reutilização impossível.

Figura 9.1 – Aspecto de uma parede dupla em alvenaria de tijolo vazado, com espuma de poliuretano preenchendo parcialmente a caixa-de-ar, durante a execução do pano exterior

9.2.1.2. Descrição da solução construtiva

A solução construtiva de referência apresenta um pano exterior em alvenaria de tijolo vazado de 15 cm e um pano interior em alvenaria de tijolo vazado de 11 cm. Os panos encontram-se separados por uma caixa-de-ar com 4 cm de espessura, parcialmente preenchida com isolante térmico em placas – poliestireno expandido extrudido –, com 2 cm de espessura e fixado ao pano interior. Os paramentos, interior e exterior, encontram-se revestidos com reboco tradicional com espessura de 1,5 cm.

A solução construtiva estudada encontra-se representada, em corte esquemático, na figura 9.2.

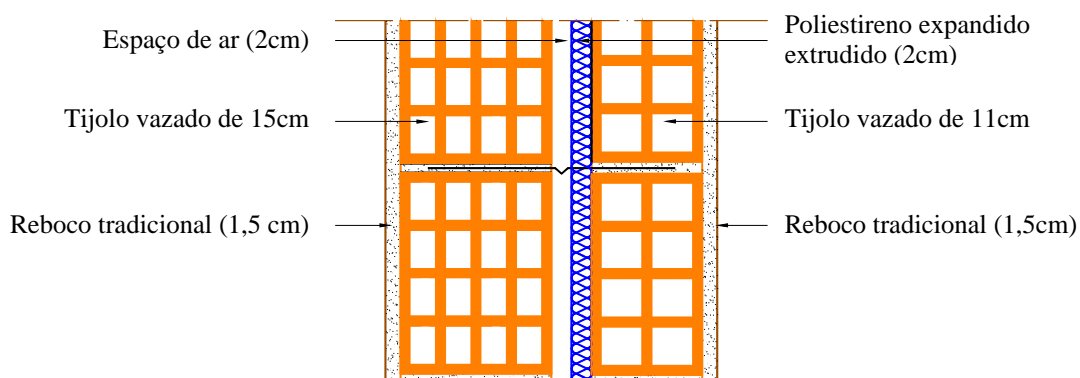



Figura 9.2 – Parede dupla em alvenaria de tijolo vazado (Par1 - solução de referência)

9.2.2. Parede dupla, com pano exterior em alvenaria de pedra aparelhada e pano interior em alvenaria de tijolo vazado

9.2.2.1. Apresentação da tecnologia construtiva

Esta tecnologia construtiva está associada aos primeiros exemplos de paredes duplas que começaram a surgir em Portugal, a partir da segunda metade do século XX. Na altura, as paredes exteriores apresentavam, na maior parte dos casos, funções estruturais, pois ainda não era corrente o recurso a soluções estruturais porticadas em betão armado. Com a introdução de um pano interior em alvenaria de tijolo vazado melhorou-se o comportamento térmico e a protecção contra a humidade das paredes exteriores, sem se comprometer o seu desempenho estrutural.

Com a introdução de estruturas porticadas em betão armado, as paredes deixaram de ter funções estruturais, pelo que a utilização de alvenaria resistente em pedra caiu em desuso. Actualmente, a alvenaria de pedra é utilizada pontualmente, e geralmente sem função estrutural, em edifícios de pequeno porte. A alvenaria de pedra é neste momento considerada uma solução construtiva nobre. A sua aparência deixou de ser camuflada com uma camada de reboco – como era corrente no passado –, passando a ser aproveitada como acabamento de fachada.

Esta tecnologia construtiva apesar de exibir, em relação à parede dupla em alvenaria de tijolo vazado, maior massa por unidade de superfície, apresenta tradicionalmente menor P.E.C. Este facto é justificado pela baixa energia necessária ao processamento da pedra, visto ser um material natural. Por outro lado, as reservas de pedra granítica são abundantes em praticamente toda a superfície terrestre. A P.E.C é tanto menor quanto mais próxima estiver a fonte de matéria-prima do local de construção. Numa situação ideal, e sempre que possível, deve ser utilizada a própria pedra extraída dos trabalhos de escavação necessários à realização das plataformas de trabalho e das fundações.

Durante o processo de desmantelamento/demolição, devido à menor resistência das juntas em relação às unidades de alvenaria, é possível retirar as unidades do pano de pedra praticamente intactas, pelo que a sua reutilização é possível. A alvenaria de pedra pode ainda ser reciclada de modo a ser utilizada sob a forma de agregados na execução de betões e argamassas. Por ser um material natural, a sua devolução ao ambiente natural não apresenta grande impacte.

Como reservas, há que salientar que a extracção de granito em pedreiras está relacionada com grandes impactes paisagísticos e nos ecossistemas locais; e que esta tecnologia, por possuir elevada massa, não é aconselhada em locais distantes da fonte de matéria-prima – os custos energéticos relacionados com o seu transporte são bastante elevados. O pano de tijolo apresenta os inconvenientes focados na tecnologia construtiva anterior. Por outro lado, apesar desta solução apresentar elevada massa, a sua inércia térmica é semelhante à da solução construtiva anterior, pois o calor armazenado no pano de pedra não é libertado para o interior devido à existência do isolante.

9.2.2.2. Descrição da solução construtiva

A solução construtiva estudada apresenta um pano exterior em alvenaria de pedra granítica com 30 cm de espessura e um pano interior em alvenaria de tijolo vazado de 11 cm. Os panos encontram-se separados por uma caixa-de-ar com 5 cm de espessura, parcialmente preenchida com isolante térmico em placas – poliestireno expandido extrudido –, com 3 cm de espessura e fixado ao pano interior. Nesta solução, apesar da espessura total ser mais elevada, para que o coeficiente de transmissão térmica fosse semelhante ao da solução de referência, foi necessário introduzir um isolante com maior espessura, o que é justificado pela elevada condutibilidade térmica do pano em alvenaria de pedra (quadro 7.6). O paramento interior é revestido com reboco tradicional com 1,5 cm de espessura.

A solução construtiva estudada encontra-se representada, em corte esquemático, na figura 9.3.

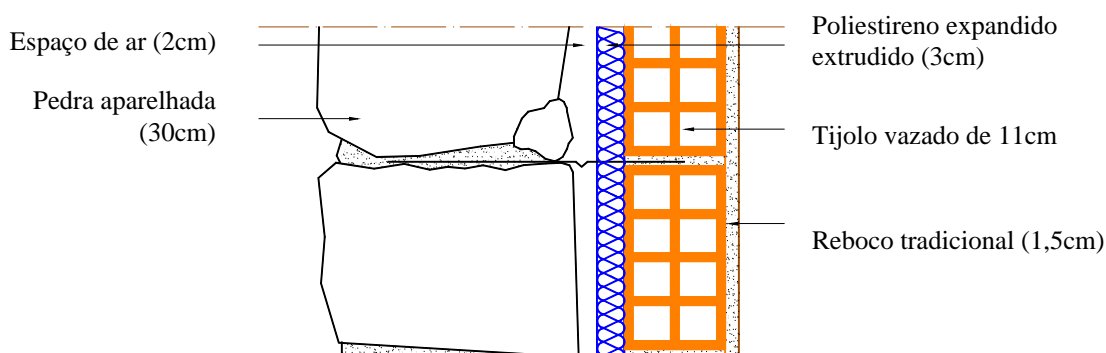



Figura 9.3 – Parede dupla com pano exterior em alvenaria de pedra granítica aparelhada e pano interior em alvenaria de tijolo vazado (Par2)

9.2.3. Parede simples com reboco armado sobre isolante contínuo pelo exterior

9.2.3.1. Apresentação da tecnologia construtiva

As paredes simples com sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior[1], também designados por “sistemas de isolamento térmico por revestimento sobre isolante”, surgiram das tentativas em se melhorar o comportamento térmico das paredes exteriores através de uma melhor correcção das pontes térmicas e da disponibilização de praticamente toda a massa da parede para a inércia térmica interior.

Podem-se utilizar dois tipos de sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior:

(i) Revestimentos espessos de ligantes minerais, armados (rebocos armados), sobre isolante;

(ii) Revestimentos delgados de ligantes sintéticos ou mistos, armados, sobre isolante.

Neste tipo de tecnologia, o isolante térmico mais utilizado é o poliestireno expandido moldado em placas (EPS). O elemento de suporte apresenta geralmente espessura superior ou igual 20 cm e é, na maior parte das vezes, em alvenaria de blocos de betão leve ou em alvenaria de tijolo de 20 ou de 22cm.

A ausência de descontinuidade na camada de isolante torna o isolamento térmico mais eficiente, o que, por um lado, potencia a diminuição do consumo energético necessário nas operações de condicionamento da temperatura do ar interior – com todas as vantagens ambientais adjacentes – e por outro, contribui para a durabilidade dos elementos construtivos e para uma melhor qualidade do ar interior – por prevenir as pontes térmicas e as consequentes condensações e desenvolvimento de fungos e algas.

Por ser constituída por apenas um pano, esta tecnologia apresenta geralmente menor massa e menor P.E.C. do que uma parede dupla com isolamento térmico semelhante.

Como reservas destacam-se: o facto da sua durabilidade ser desconhecida, pois trata-se de uma tecnologia relativamente recente; e a necessidade do sistema de isolamento pelo exterior ser realizado por mão-de-obra especializada. Esta tecnologia apresenta, quanto à utilização de elementos em tijolo, as mesmas reservas enumeradas na solução de referência.

Nas figuras 9.4 e 9.5 apresenta-se o aspecto de uma parede com isolamento térmico pelo exterior, antes e após a realização da camada de reboco.

---

[1] Designados na língua inglesa pela sigla ETICS (external thermal insulating composite systems with rendering).

Figura 9.4 – Aspecto de uma parede simples com reboco armado, sobre isolante contínuo pelo exterior, durante a aplicação do isolante

Figura 9.5 – Aspecto de uma parede simples com reboco armado, sobre isolante contínuo pelo exterior, após a execução do reboco

9.2.3.2. Descrição da solução construtiva

A solução construtiva apresenta o elemento de suporte em alvenaria de tijolo vazado com 22 cm de espessura. O material seleccionado para isolante térmico desta solução foi o poliestireno expandido moldado em placas. Para que o comportamento desta solução fosse semelhante ao da solução de referência, o isolante apresenta 4 cm de espessura. Sobre a camada isolante encontra-se o reboco armado de ligantes minerais, com 1 cm de espessura.

A solução construtiva estudada encontra-se representada, em corte esquemático, na figura 9.6.

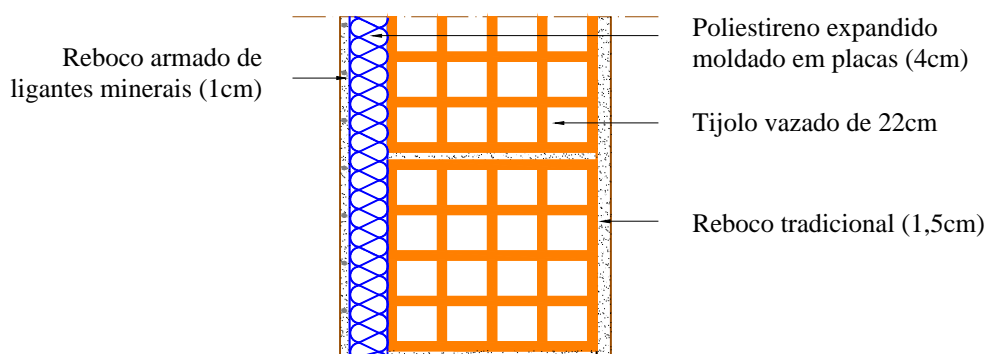



Figura 9.6 – Parede simples com reboco armado sobre isolante contínuo pelo exterior (Par3)

9.2.4. Parede dupla, com pano exterior em alvenaria de tijolo maciço com face à vista e pano interior em alvenaria blocos de betão celular autoclavado

9.2.4.1. Apresentação da tecnologia construtiva

Apesar do betão celular autoclavado ser bastante utilizado noutros países, em Portugal a sua utilização tem sido muito reduzida.

Este material apresenta uma porosidade elevada, pelo que em contacto com a humidade, acaba por a absorver, comprometendo o seu bom isolamento térmico. Assim, o betão celular autoclavado deve estar protegido do contacto directo com a humidade através de camada de revestimento impermeabilizante ou de um pano exterior noutro material.

A sua massa é semelhante ao de uma parede dupla de alvenaria de tijolo vazado e a P.E.C é ligeiramente superior, o que se deve principalmente ao pano de tijolo maciço. O isolamento do pano em betão celular autoclavado é superior ao de um pano em tijolo vazado com a mesma espessura, o que, em alguns casos, torna desnecessária a aplicação de isolantes térmicos.

Como principais reservas, destacam-se o custo mais elevado em relação à tecnologia de referência e a sua baixa disponibilidade no mercado português.

Para informação mais detalhada acerca das soluções construtivas em betão celular autoclavado, consultar o capítulo 5.3.

9.2.4.2. Descrição da solução construtiva

A solução construtiva é constituída por pano exterior em alvenaria de tijolo maciço com 7 cm de espessura e pano interior em blocos de betão celular autoclavado com 17,5 cm de espessura. Os dois panos encontram-se separados por caixa-de-ar com 2 cm de espessura. Neste caso, devido à baixa condutibilidade do betão celular autoclavado, não foi necessária a integração de materiais isolantes.

A solução construtiva estudada encontra-se representada, em corte esquemático, na figura 9.7.

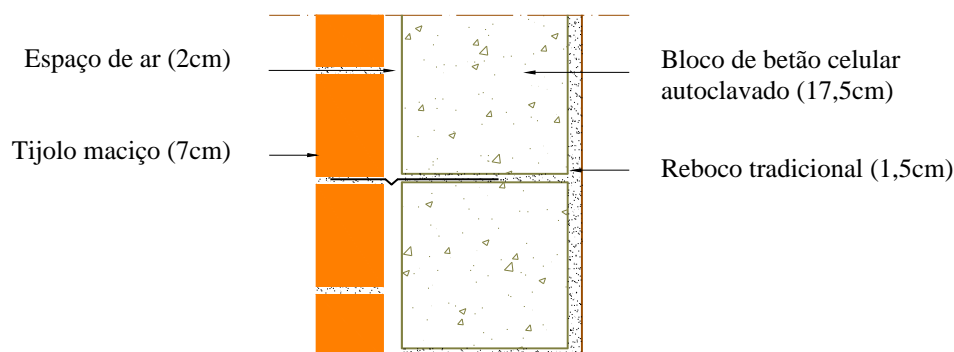



Figura 9.7 – Parede dupla com pano exterior em alvenaria de tijolo maciço com face à vista e pano interior em alvenaria de blocos de betão celular autoclavado (Par4)

9.2.5. Parede ventilada, com elemento de suporte em alvenaria de blocos de betão leve e revestimento cerâmico descontínuo fixado em estrutura metálica

9.2.5.1. Apresentação da tecnologia construtiva

A fachada ventilada é uma tecnologia que surgiu da procura de soluções para a envolvente vertical cada vez menos espessas e, por conseguinte, mais leves, compostas por uma série de camadas com funções cada vez mais específicas.

Esta tecnologia tanto pode ser integrada na construção de edifícios novos, como apresenta grande potencialidade de ser aplicada na reabilitação de fachadas que apresentam problemas de isolamento térmico, acústico, impermeabilização ou de fissuração.

Esta tecnologia é composta pelo elemento de suporte – geralmente uma parede simples de alvenaria –, pelo isolante contínuo pelo exterior – que na maior parte das vezes é a espuma de poliuretano projectado – e pelo revestimento descontínuo – cerâmico, vidro, OSB, etc. – que é fixado ao elemento de suporte através de uma estrutura metálica. O espaço de ar formado entre o revestimento e o isolante é ventilado, o que contribui para a remoção da humidade existente nesse local proveniente da chuva ou formada por condensação. Podem assim, ser utilizados isolantes que, por serem mais sensíveis à humidade, não são utilizados correntemente nas soluções de isolamento da envolvente exterior – por exemplo, cortiça e fibra de coco.

O revestimento descontínuo actua como uma barreira que protege o isolante e o elemento de suporte das acções exteriores – vento, radiação solar, água, etc. Deste modo, assegura-se uma maior durabilidade para os materiais que compõem os elementos verticais do edifício. Com a camada isolante contínua evitam-se pontes térmicas e condensações, dotando o edifício de uma maior qualidade e conforto.

Ao nível das reservas, há a destacar, relativamente à tecnologia convencional, o custo de construção mais elevado que, no entanto, poderá ser compensado por uma manutenção com

menores custos: este tipo de revestimento, ao ser composto por uma série de elementos independentes, permite a fácil substituição/reparação das peças danificadas.

Para informação mais detalhada acerca desta tecnologia, consultar o capítulo 6.2. Nas figuras 9.8 e 9.9 apresenta-se, respectivamente, o aspecto de uma parede ventilada durante uma das fases de construção e após a sua conclusão.

Figura 9.8 – Aspecto de uma parede ventilada com isolamento em espuma de poliuretano e revestimento descontínuo em vidro fixado em estrutura metálica, durante a fase de colocação do revestimento

Figura 9.9 – Aspecto de uma parede ventilada com isolamento em espuma de poliuretano e revestimento descontínuo em vidro fixado em estrutura metálica, após a conclusão dos trabalhos

9.2.5.2. Descrição da solução construtiva

Na solução construtiva em estudo, o elemento de suporte é em alvenaria de blocos de betão leve – com agregados de argila expandida – com 20cm de espessura. Sobre a superfície exterior do elemento de suporte está fixada a camada isolante contínua em aglomerado negro de cortiça com 2,5 cm de espessura. O revestimento é composto por peças cerâmicas com 1cm de espessura que se encontram fixadas ao elemento de suporte através de uma estrutura metálica.

A solução construtiva estudada encontra-se representada, em corte esquemático, na figura 9.10.

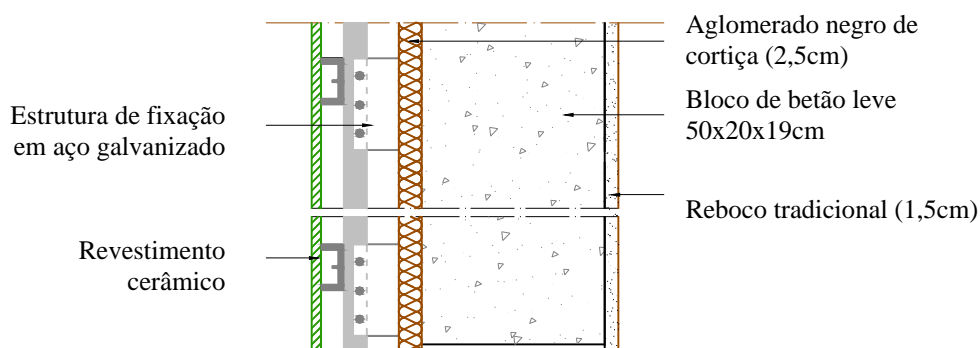



Figura 9.10 – Parede ventilada com elemento de suporte em alvenaria de blocos de betão leve e revestimento cerâmico descontínuo fixado em estrutura metálica (Par5)

9.2.6. Parede com estrutura metálica leve

9.2.6.1. Apresentação da tecnologia construtiva

A procura de tecnologias construtivas mais sustentáveis tem levado ao aparecimento de soluções mais leves e com maior grau de industrialização. As soluções construtivas com estrutura de perfis metálicos, obtidos por moldagem a frio de chapa galvanizada de aço de pequena espessura, constituem um dos caminhos seguidos para a satisfação desses desígnios.

Esta tecnologia apresenta, relativamente à tecnologia convencional, maior grau de industrialização do processo construtivo, pelo que está associada à utilização mais racional de recursos – materiais e mão-de-obra. A sua baixa massa, torna-a adequada a locais em que a distância de transporte dos materiais e componentes de construção é elevada.

Esta tecnologia, por integrar espessas camadas isolantes, contribui para a redução das perdas e ganhos de calor. No entanto, a sua baixa inércia térmica deverá ser compensada, em locais com grandes amplitudes térmicas e sistemas intermitentes de condicionamento da temperatura do ar, pela integração de outros elementos construtivos – por exemplo pavimentos – de elevada massa.

Esta é uma tecnologia relativamente recente em Portugal, existindo ainda carências ao nível de mão-de-obra especializada, o que a torna ainda pouco competitiva em termos de custo de construção. Por outro lado, a sua durabilidade é ainda desconhecida.

No final da sua vida útil, devido ao facto das ligações entre os diversos componentes serem mecânicas, o processo de desconstrução é simples e o potencial de reutilização elevado.

Informação mais detalhada acerca desta tecnologia pode ser encontrada no capítulo 5.2. Nas figuras 9.11e 9.12 encontram-se apresentados dois aspectos deste tipo de tecnologia durante a fase de construção.

Figura 9.11 – Aspecto do interior de uma parede com estrutura de perfis metálicos leves, em fase de construção – antes da colocação da lã de rocha e da execução do revestimento interior

Figura 9.12 – Aspecto da face exterior de uma parede com estrutura de perfis metálicos leves, em fase de construção – durante a fixação do EPS às placas OSB

9.2.6.2. Descrição da solução construtiva

A estrutura da parede é formada por perfis leves de aço com 14 cm de altura. O revestimento interior é composto por duas camadas de painéis de gesso cartonado, fixadas mecanicamente à estrutura de aço, com espessura total de 2,5 cm. O revestimento exterior é composto pelo revestimento estrutural e pelo revestimento compósito de isolamento térmico contínuo pelo exterior. O revestimento estrutural é formado por painéis OSB, com 1,2cm de espessura, fixados mecanicamente à estrutura. Sobre os painéis OSB é fixada a camada isolante – poliestireno expandido moldado em placas – com 1cm de espessura, seguindo-se, por fim, o reboco armado de ligantes minerais com 1cm de espessura. A cavidade formada entre os revestimentos interior e exterior é preenchida por camadas de mantas de lã de rocha, que perfazem uma espessura total de 14 cm.

A solução construtiva estudada encontra-se representada, em corte esquemático, na figura 9.13.

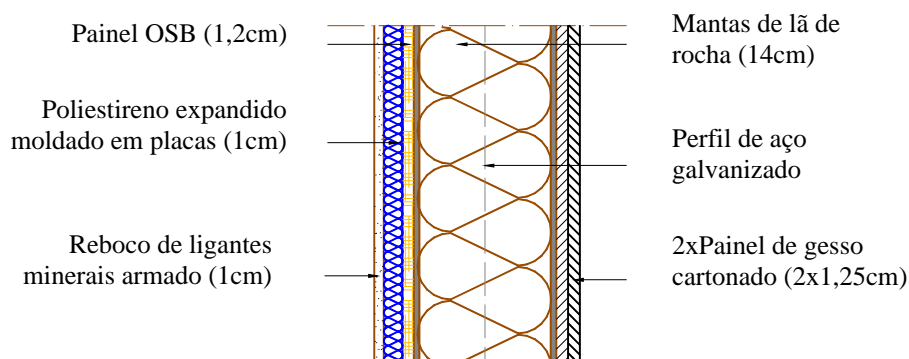
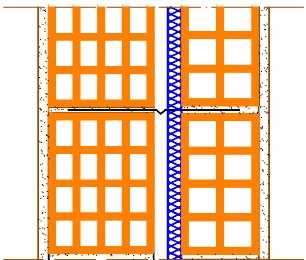
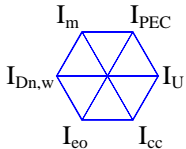
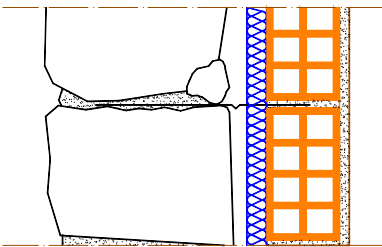
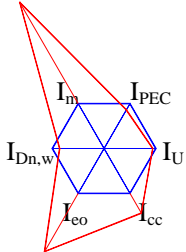
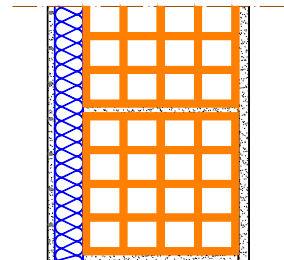
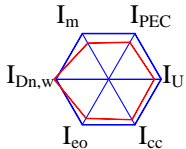
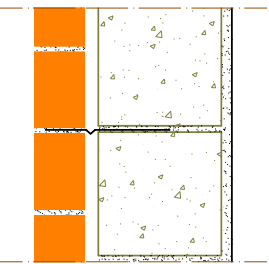
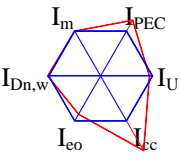
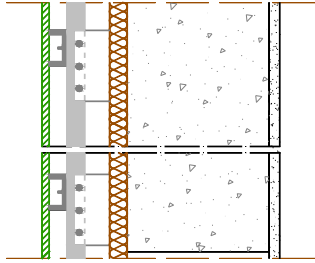
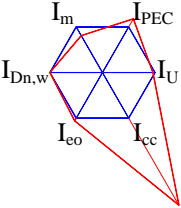
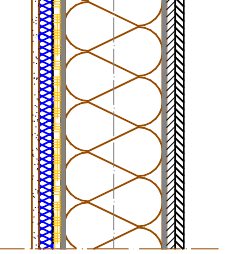
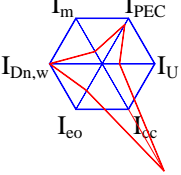



Figura 9.13 – Parede com estrutura em perfis leves de aço (Par6)

Quadro 9.2 – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para paredes exteriores

Solução construtiva	Massa (kg/m^2)	PEC (kW.h/m^2)	$D_{n,w}$ (dB)	U (W/m^2.ºC)	Largura (cm)	Custo (€/m^2)	Perfil sustentável
Par1 (referência) – descrição em 9.2.1	279	197	51	0,70	33,00	46,68	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ I_U I_{eo} I_{cc}
Par2 – descrição em 9.2.2	909	169	59	0,65	47,50	125,92	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ I_U I_{eo} I_{cc}
Par3 – descrição em 9.2.3	220	159	49	0,60	28,50	41,75	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ I_U I_{eo} I_{cc}

Quadro 9.2 (cont.) – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para paredes exteriores

Solução construtiva	Massa (kg/m^2)	PEC (kW.h/m^2)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m^2.ºC)	Custo (€/m^2)	Perfil sustentável
Par4 – descrição em 9.2.4	280	244	50	0,65	28,00	77,55	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ I_U I_{eo} I_{cc}
Par5 – descrição em 9.2.5	225	234	51	0,65	35,00	135,80	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ I_U I_{eo} I_{cc}
Par6 – descrição em 9.2.6	76	171	51	0,23	19,60	133,40	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ I_U I_{eo} I_{cc}

9.3. Resultados obtidos

Os resultados obtidos encontram-se apresentados no quadro 9.2.

9.4. Discussão dos resultados

Analisando os resultados obtidos na aplicação da metodologia MARS-SC às seis soluções construtivas para paredes exteriores, verifica-se que, dentro desta amostra e de acordo com os parâmetros analisados, a **solução construtiva mais sustentável é a Par6** – parede com estrutura de perfis leves de aço –, enquanto que a **solução construtiva menos sustentável é a Par2** – parede dupla com pano exterior em alvenaria de pedra aparelhada e pano interior em alvenaria de tijolo furado.

No quadro 9.3, apresentam-se as soluções construtivas ordenadas por ordem decrescente de sustentabilidade.

As características que mais contribuem para que a **solução construtiva Par6** (parede com estrutura metálica leve) seja a mais sustentável são: a baixa massa, a baixa espessura e o bom isolamento térmico. Em contrapartida apresenta um custo de construção que é cerca de 185% superior ao custo da solução de referência. No entanto, numa análise económica global, que aborde as diversas fases do ciclo de vida de um edifício, esta diferença poderá vir a ser atenuada, devido principalmente aos seguintes factores: a menor massa permite importantes poupanças ao nível das fundações; a menor espessura permite a maximização das áreas interiores vendáveis; o superior isolamento térmico potencia a diminuição do consumo de energia convencional necessário à manutenção da temperatura interior dentro de valores confortáveis; no final da vida útil do edifício, o processo de desconstrução é possível e simples – pois os diversos elementos estão ligados mecanicamente entre si –, o que potencia a reutilização de elementos que se encontrem em bom estado e a reciclagem – o aço é 100% reciclável.

Quadro 9.3 – Soluções construtivas para paredes, ordenadas por ordem decrescente de sustentabilidade

Posição	Solução construtiva	
1º	Par6	**Mais sustentável**
2º	Par3	↑
3º	Par1	
4º	Par4	
5º	Par5	
6º	Par2	**Menos sustentável**

A solução construtiva **Par3** (parede simples com reboco armado sobre isolante contínuo pelo exterior) é a mais equilibrada, pois é melhor do que a solução de referência ao nível de praticamente todos os parâmetros. Apresenta apenas alguma desvantagem no isolamento sonoro. O menor isolamento sonoro é justificado pelo facto de ser um elemento simples. É de salientar que o isolamento térmico pelo exterior potencia a correcção e a prevenção de pontes térmicas, pelo que se se tivesse em conta este factor, a diferença ao nível do isolamento térmico seria substancialmente superior.

Como se pode verificar, **a solução construtiva convencional – Par1 –** (parede dupla de alvenaria de tijolo vazado) não está mal posicionada na amostra analisada. O seu baixo custo e o desempenho equilibrado em todos os parâmetros analisados, justificam a sua actual expressão na construção de edifícios. No entanto, é preciso não esquecer que esta tecnologia está associada à produção de grande quantidade de resíduos durante as fases de construção e demolição, o que corresponde a um grande desperdício de recursos.

A solução construtiva **Par4** (parede dupla, com pano exterior em alvenaria de tijolo maciço com face à vista e pano interior em alvenaria blocos de betão celular autoclavado) está associada a um maior investimento inicial – cerca de 66% superior ao da solução de referência – sem que tal se reflicta na melhoria significativa de algum dos restantes parâmetros analisados. A única vantagem é que a sua espessura é ligeiramente inferior à da solução de referência. O pano em alvenaria de tijolo maciço – cuja função principal é a de proteger o pano de betão celular autoclavado – contribui significativamente para a massa e energia primária da parede, prejudicando, na mesma medida, a sustentabilidade desta solução.

Na amostra analisada, a solução que apresenta maior custo de construção é a **Par5** (parede ventilada). Nesta solução, o investimento inicial é superior em cerca de 190% ao da solução de referência, sem que esta diferença se reflicta na melhoria significativa de algum dos restantes parâmetros analisados. A maior parte do seu custo de construção está associada à estrutura metálica de fixação e ao revestimento exterior. Em contrapartida, este tipo de revestimento potencia a diminuição dos custos de manutenção da fachada, pois permite a fácil substituição de alguma peça que esteja danificada. No final da sua vida útil a estrutura metálica pode ser reutilizada – se o seu estado de conservação o permitir – ou 100% reciclada.

A solução construtiva **Par2** (parede dupla, com pano exterior em alvenaria de pedra aparelhada e pano interior em alvenaria de tijolo vazado) revelou-se a menos sustentável, fundamentalmente devido ao facto da sua massa e espaço ocupado serem substancialmente superiores aos das restantes soluções. A integração desta solução em paredes não estruturais não apresenta qualquer vantagem, a não ser que se pretenda o aproveitamento arquitectónico do aspecto da pedra. No entanto, existem soluções de revestimento compostas por placas de pedra, cujo aspecto se assemelha ao desta solução, e que permitem uma utilização mais racional de recursos.

PARTE IV

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

CAPÍTULO 10

CONSIDERAÇÕES FINAIS

10.1. Conclusões

Neste capítulo apresenta-se uma síntese dos principais assuntos abordados e desenvolvidos ao longo deste trabalho. Embora se tenham efectuado nos capítulos anteriores sucessivas alusões a aspectos relacionados com a problemática da sustentabilidade na construção e a tecnologias que permitem que a Construção seja cada vez mais compatível com os desígnios do desenvolvimento sustentável, procede-se aqui a uma sinopse dos considerandos mais importantes, não obstante as conclusões da aplicação da metodologia da avaliação da sustentabilidade de soluções construtivas a pavimentos e a paredes exteriores já terem sido referidas no final do oitavo e nono capítulo, respectivamente. Deste modo, embora não seja um propósito explícito, podem porventura aqui surgir algumas repetições de assuntos já salientados nos capítulos anteriores, no sentido de enfatizar a importância dos mesmos no contexto da "Construção Sustentável".

A Construção, nomeadamente o sector dos edifícios, é um dos sectores económicos mais importantes em Portugal. No entanto, está demasiadamente associada a tecnologias construtivas pouco evoluídas, a processos de construção tradicionais e a mão-de-obra não qualificada, pelo que é responsável por um grande impacte ambiental, com grande potencial em ser reduzido. Na Parte I deste trabalho é discutido o impacte ambiental da Construção, principalmente do sector dos edifícios, sendo identificados os principais recursos e produtos directa e indirectamente associados. Para cada um dos recursos e produtos são enumeradas algumas soluções que potenciam a diminuição desse impacte. Estas soluções deverão ser consideradas pela Equipa de Projecto, fundamentalmente durante a Fase de Projecto. A compatibilização do desenho dos edifícios com as condições climáticas do local – desenho passivo – bem como a integração de certas tecnologias, como os sistemas solares de aquecimento de água, sistemas de sombreamento e os painéis fotovoltaicos, são algumas das respostas possíveis.

Na Parte II são apresentadas algumas razões para o atraso relativo da Indústria da Construção relativamente às demais indústrias, bem como as evoluções espectáveis no domínio dos produtos, materiais e processos desta indústria. Os factores mais relevantes, que se apontam para este atraso significativo são: factores económicos, a baixa qualificação dos operários da Construção e a falta de formação dos técnicos da Construção. Nesta Parte, são também apresentados alguns sistemas construtivos não convencionais, que são correntemente considerados mais sustentáveis do que os convencionais: sistemas construtivos em terra – Adobe, Taipa e “BTC”; sistemas construtivos em estruturas metálicas leves – LGSF (*Light Gauge Steel Framing*); e sistemas construtivos em betão celular autoclavado. Para cada sistema construtivo são discutidos alguns aspectos relacionados com as suas características técnico-funcionais (constituição, processo construtivo, comportamento estrutural, comportamento térmico, isolamento sonoro, resistência ao fogo, sustentabilidade ambiental, construtibilidade, disponibilidade e custo) e são apresentadas algumas vantagens desses sistemas, bem como as dificuldades adjacentes à sua implementação, relativamente ao sistema construtivo convencional. Neste domínio destacam-se as vantagens dos sistemas construtivos que utilizam soluções construtivas leves na envolvente a par de soluções construtivas pesadas com funções de armazenamento térmico, no interior. Atendendo à influência da envolvente no consumo energético dos edifícios, no final desta Parte destacam-se duas tecnologias construtivas não convencionais para as paredes exteriores: a parede de Trombe e a fachada ventilada. A parede de Trombe é actualmente uma das soluções construtivas mais utilizadas no projecto solar passivo, enquanto que a fachada ventilada corresponde à evolução do conceito de fachada, no sentido de soluções cada vez menos espessas e, por conseguinte, mais leves; compostas por uma série de camadas com funções cada vez mais específicas.

Atendendo à necessidade premente em se distinguir a sustentabilidade das diversas soluções construtivas disponíveis no mercado, com vista à selecção daquelas que potenciam um futuro mais sustentável para a Construção, encontram-se desenvolvidos ou em fase de desenvolvimento, em alguns países onde a sustentabilidade já ganhou o merecido destaque, algumas ferramentas e sistemas de avaliação da sustentabilidade dos edifícios: o BREEM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Methode*); o LEED (*Leadership in Energy & Environmental Design*); GBTool (*Green Building Challenge*); entre outros. Estes sistemas encontram-se sobretudo orientados para a avaliação do desempenho ambiental dos edifícios, numa perspectiva global, e para as soluções construtivas específicas do país de origem. É deste modo necessário desenvolver metodologias específicas para a avaliação da sustentabilidade global dos edifícios portugueses, ou então, criar bases de dados, que reúnam as principais características das soluções construtivas convencionalmente utilizadas em Portugal, para que se possam utilizar as ferramentas e sistemas já existentes. Assim, na Parte III desenvolveu-se uma metodologia específica para a avaliação da sustentabilidade de soluções construtivas à qual se a atribuiu a designação de MARS-SC (Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas). Esta metodologia aborda três grupos de parâmetros: ambientais, funcionais e económicos. O número de parâmetros analisados dentro de cada grupo poderá ser ajustado em função das características específicas de cada solução construtiva, das suas exigências funcionais, dos objectivos da avaliação e dos dados disponíveis. Neste trabalho, a metodologia foi aplicada a algumas soluções construtivas convencionais e não convencionais para pavimentos e paredes exteriores. Neste estudo foram considerados na avaliação da sustentabilidade das soluções construtivas dois parâmetros ambientais: massa da

solução e energia primária incorporada (PEC); três parâmetros funcionais: isolamento sonoro a sons de condução aérea, isolamento sonoro a sons de percussão (só nos pavimentos), isolamento térmico e espaço ocupado (só nas paredes); e um económico (custo de construção). Ao nível dos pavimentos foram analisadas cinco tecnologias construtivas distintas: pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas e blocos de cofragem cerâmicos; pavimentos em laje maciça de betão armado; pavimentos em painéis alveolares prefabricados de betão armado; pavimentos mistos com cofragem metálica colaborante; e pavimentos em madeira. Relativamente aos parâmetros considerados nesta avaliação, os resultados obtidos apontam para a maior sustentabilidade das soluções com cofragem metálica colaborante, que apresentam como maiores vantagens a baixa massa e baixa energia incorporada (PEC) e como maior reserva o superior custo de construção, relativamente à solução convencional: laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem. Os pavimentos de madeira são a tecnologia mais compatível com o meio ambiente, pois dentro da amostra analisada são os que apresentam menor massa e menor PEC. No entanto, não são a tecnologia mais sustentável, devido principalmente ao seu custo muito elevado. Ao nível das paredes exteriores foram analisadas cinco tecnologias construtivas diferentes: parede dupla de alvenaria de tijolo vazado; parede dupla, com pano exterior em alvenaria de pedra aparelhada e pano interior em alvenaria de tijolo vazado; parede simples com reboco armado, sobre isolante contínuo pelo exterior; parede dupla, com alvenaria de tijolo maciço com face à vista e pano interior em alvenaria de blocos de betão celular autoclavado; parede ventilada, com elemento de suporte em alvenaria de blocos de betão leve e revestimento cerâmico descontínuo fixado em estrutura metálica; parede com estrutura em perfis leves de aço. Os resultados apontam, relativamente aos parâmetros analisados, a parede do tipo sanduíche com estrutura metálica leve como a solução mais sustentável. Este tipo de tecnologia permite a redução da quantidade de matéria-prima e energia incorporadas nos edifícios, sem com isso comprometer a funcionalidade exigida às paredes exteriores. Por outro lado, apresenta maior potencial de reutilização e/ou de reciclagem do que a solução convencional para as paredes exteriores: parede dupla de alvenaria de tijolo. O custo mais elevado e o desconhecimento do comportamento desta tecnologia a longo prazo são apontados como as principais barreiras à sua difusão em Portugal. A curto prazo, pensa-se que a tecnologia de fachada com parede simples e isolamento térmico contínuo pelo exterior irá assumir a liderança no conjunto das soluções para paredes exteriores. O custo ligeiramente inferior, a menor massa, a menor PEC e a maior possibilidade em corrigir as pontes térmicas, são os principais factores que potenciam a utilização desta tecnologia, em detrimento da tecnologia convencional.

10.2. Perspectivas futuras

A sustentabilidade no domínio da Construção é ainda uma temática bastante recente em Portugal. Grande parte das empresas deste sector, bem como a população portuguesa em geral, não estão convenientemente informados acerca das vantagens individuais e colectivas adjacentes à "Construção Sustentável". Noutros países mais desenvolvidos, como por exemplo, na Dinamarca, Suécia, Noruega, Austrália e Inglaterra, esta temática deixou de ser há muito tempo uma bandeira exclusiva dos ambientalistas, sendo actualmente um dos aspectos com grande peso na avaliação da qualidade global de um imóvel. A sustentabilidade na construção tem-se afirmado nesses países como uma mais-valia que tem potenciado as vendas de soluções com o rótulo sustentável. Em Portugal, ainda há muito a fazer neste domínio. Em primeiro lugar será

necessário sensibilizar a população para as consequências que o rumo actual tem e terá para a sua qualidade de vida e para a qualidade de vida das gerações futuras. A partir desse momento as empresas serão obrigadas a adaptarem-se aos novos desígnios dos utilizadores, sob a pena de não sobreviverem num mercado cada vez mais competitivo. Portugal correrá o risco de não cumprir os objectivos traçados pelo Protocolo de Quioto, no qual foi signatário, pelo que o Estado, como entidade interessada, deverá assumir a maior parte da responsabilidade na consciencialização da população, através da realização de campanhas elucidativas. Outra via possível passa pela publicação de novos documentos normativos mais exigentes no domínio do consumo energético e na gestão de resíduos na Construção.

A partir do momento em que o rótulo "Construção Sustentável" se afirme em Portugal como uma mais-valia na venda dos produtos da Construção, caberá ao Estado a criação de um organismo com competências fiscalizadoras neste domínio, pois este rótulo poderá estar a ser utilizado falaciosamente por algumas empresas, o que poderá pôr em causa todo este processo. Neste momento, poderão existir no mercado alguns produtos intitulados "sustentáveis" e que na realidade não apresentam quaisquer vantagens relativamente aos produtos convencionalmente utilizados, podendo até apresentar certos inconvenientes. Também é necessário encetar várias medidas para evitar certos erros do passado, que tiveram lugar em alguns países mais desenvolvidos, onde o conceito de "Construção Sustentável" foi desvirtuado pelos mais fundamentalistas e ficou quase que irremediavelmente associado à construção compatível com o meio ambiente, mas pouco funcional e com elevados custos de operação e manutenção.

Também aos projectistas – Arquitectos e Engenheiros – caberá parte das responsabilidades neste domínio, através da selecção de tecnologias que potenciem a compatibilização da Construção, principalmente o sector dos edifícios, com o meio ambiente, sociedade e economia. A maior parte das tecnologias construtivas disponíveis no mercado que permitem aproximar a Construção dos objectivos traçados para o desenvolvimento sustentável, apresentam um custo económico de construção superior ao das tecnologias convencionalmente utilizadas. Se no entanto, para além do valor acrescentado relacionado com o seu menor custo ambiental, estas tecnologias apresentarem menores custos económicos durante as restantes fases do seu ciclo de vida, a sua procura tenderá a aumentar. À medida que a procura for aumentando, o número de empresas interessadas em comercializar essas tecnologias irá aumentar. Desse modo, uma concorrência audaz e tecnologicamente evoluída será incentivada a melhorar a sua produtividade e consequentemente os preços diminuirão. A utilização de equipamentos que permitem o aproveitamento de recursos endógenos da Terra (sol, vento, etc.) será generalizada com a diminuição dos custos.

Em Portugal, apesar do atraso relativo da indústria da construção, estas preocupações tenderão paulatinamente a ser introduzidas nos Projectos de Construção, pois as consequências do rumo actual serão irreversíveis, com custos extremamente elevados para a Humanidade.

Em suma, espera-se que as práticas aconselhadas, a metodologia MARS-SC desenvolvida e os resultados obtidos sejam um contributo para os diversos intervenientes da Construção, nas tomadas de decisão que potenciem a realização de edifícios cada vez mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Parte I

AGO (2003), **DESIGN FOR LIFESTYLE AND THE FUTURE – Technical Manual**, Australian Greenhouse Office, Australian Government, Australia. [online em 01/03/2003], http://www.greenhouse.gov.au.

Athens, Lucia; Fergunson, Bruce K. (1996). **WATER ISSUES,** *in* Sustainable Building Technical Manual – Green Building Design, Construction, and Operation, Public Technologies, Inc, USA.

Berge, Bjorn (2000), **ECOLOGY OF BUILDING MATERIALS**, Architectural Press, England.

Bernheim, Anthony (1996), **INDOOR AIR QUALITY,** *in* Sustainable Building Technical Manual – Green Building Design, Construction, and Operation, Public Technologies, Inc, USA.

Brown, Lester; Flavin, Cristopher; Postel, Sandra (1991). **SAVING THE PLANET**, W. W, Norton, New York.

Brüsecke, F. J. (1996), **DESESTRUTURAÇÃO E DESENVOLVIMENTO**. In: Ferreira, L. da C. e Viola, E., Incertezas de sustentabilidade na globalização. Campinas: Unicamp. Pp:103-32.

CEEETA (2004), **TECNOLOGIAS DE MICRO-GERAÇÃO E SISTEMAS PERIFÉRICOS**, Centro de Estudos em Economia de Energia, dos Transportes e do Ambiente, [online em 2004/03/14], http://www.ceeeta.pt.

Comissão Europeia (1999). **CONSTRUCTION AND DEMOLITION WAST MANAGEMENT PRACTICES, AND THEIR ECONOMIC IMPACTS**, Final Report to DGXI, February.

DECO (2003); **ÁGUA-Dicas Para Poupar Até à Ultima Gota**, *in* Revista Proteste nº 230, Julho/Agosto.

ENERGAIA (2003), **VANTAGENS DA ENERGIA SOLAR**, Agência Municipal de Energia de Gaia, [online em 2003/07/12], http://www.energaia.pt.

Frénot, Michel; Sawaya, Nabih (1979), **O ISOLAMENTO TÉRMICO**, Colecção Novas Energias, Edições CETOP.

Gonçalves, Helder; Joyce, António; Silva, Luís (2002); **FORUM ENEGIAS RENOVÁVEIS EM PORTUGAL – Uma contribuição para os objectivos da política energética e ambiental**, ADENE/INETI, Lisboa, Dezembro.

Hannequart, J. P (2002), **EUROPEAN WASTE POLICY**. *In* Conferências Lipor – "Os Desafios do Século XXI", Valongo.

Howard, N. J., e P. Roberts, "Environmental Comparations" (1995), em **THE ARCHITECTS JOURNAL**, vol 21, Setembro.

Kibert, C. (1994), **"ESTABLISHING PRINCIPLES AND MODEL FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION**", *in Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16*, Tampa, EUA.

Ngowi, Alfred B. (2000); **COMPETING WITH ENVIRONMENTAL FRIENDLY CONSTRUCTION PRATICS – Technical Article**; Cost Engineering - The International Journal of Cost Estimation, Cost/Schedule Control, and Project Management; AACEI.

Teixeira, José M. Cardoso; Almeida, M. Manuela Guedes de (2001). **TECNOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO E UTILIZAÇÃO RACIONAL DE ENERGIA**; Jornadas de Engenharia Civil 2001– Promover um Desenvolvimento Sustentável, DEC – Universidade do Minho, Dezembro.

Tshudy, James A. (1996), **MATERIALS AND SPECIFICATIONS,** *in* Sustainable Building Technical Manual – Green Building Design, Construction, and Operation, Public Technologies, Inc, USA.

Von Weizsacker, E., A. B. Lovins, e L. H. Lovins (1997). **FACTOR FOUR: DOUBLING WEALTH, HALVING RESOURCE USE**, Earthscan Publications Ltd., Londres.

Yeang, Ken (2001), **EL RASCACIELOS ECOLÓGICO**, Editorial Gustavo Gili, Barcelona.

Parte II

2Mil Aço (2003), **APRESENTAÇÃO DE LIGHT GAUGE STEEL FRAME**, 2Mil Aço - sistemas construtivos em estruturas leves de aço, documento apresentado na disciplina de Tecnologia da Construção, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Fevereiro, 2003.

AACPA (2003), **AAC PHOTO GALLERY**, Autoclaved Aerated Concrete Products Association, USA, [online em 2003/11/05], http://www.aacpa.org.

ACCOA (2003), **AUTOCLAVED AERATED CONCRETE – Design Guide**, Aerated Concrete Corporation Of America, USA, [online em 2003/11/01], http://www.acco-acc.com.

AGO (2003), **DESIGN FOR LIFESTYLE AND THE FUTURE – Technical Manual**, Australian Greenhouse Office, Australian Government, Australia. [online em 01/03/2003], http://www.greenhouse.gov.au.

Almeida, M. Guedes de; Bragança, L.; Silva; S. Monteiro; Mendonça, P. (2002). **THERMAL PERFORMANCE OF A MBT SOLUTION - a case study**; Livro de Actas - Volume 3; XXX IAHS Word Congress on Housing - Housing Construction, An Interdisciplinary Task; University of Coimbra - Faculty of Sciences and Technology; Coimbra, Portugal.

BABB (2003), **AUTOCLAVED AERATED CONCRETE BUILDING SYSTEMS**, Babb International, Ringgold, GA, USA, [online em: 2003/11/04], http://www.babb.com.

Bentil, Daniel (2001). **ALTERNATIVE RESIDENTIAL CONSTRUCTION SYSTEMS – Second Edition**; Shimberg Center for Affordable Housing, College of Design, Construction and Plannig, University of Florida, U.S.A.

Bertagnin, Mauro (1999). **ARCHITETTURE DI TERRA IN ITALIA - Tipologie, technologie e culture costruttive**, EDICOM edizioni, Monfalcone, Itália.

Bragança[1], L; Almeida, M. Guedes de, Silva; S. Monteiro; Mendonça, P. (2002). **ACOUSTIC PERFORMANCE OF A MBT SOLUTION - a case study**; Livro de Actas - Volume 3; XXX IAHS Word Congress on Housing - Housing Construction, An Interdisciplinary Task; University of Coimbra - Faculty of Sciences and Technology; Coimbra.

Bragança[2], L; Almeida, M. Guedes de; Mateus, Ricardo. Monteiro; Mendonça, P. (2002). **COMPARISON BETWEEN CONVENTIONAL AND MBT CONSTRUCTIVE SOLUTIONS FROM AN ECONOMICAL AND ENVIRONMENTAL POINT OF VIEW – case study**; Livro de Actas - Volume 2; XXX IAHS Word Congress on Housing - Housing Construction, An Interdisciplinary Task; University of Coimbra - Faculty of Sciences and Technology; Coimbra.

Bukoski, S.C. (1998), **AUTOCLAVED AERATED CONCRETE: Shaping the Evolution of Residential Construction in the United States**, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Tecnology, Atlanta, GA, USA.

Construdobe (2003). **PORQUÊ CONSTRUIR COM ADOBE?**, Construdobe – Sociedade de Construção Civil Lda, Lagos, Algarve, Portugal, [online em 2003/04/04], http://www.construdobe.com.

CURRAN (2003), **HEBEL AUTOCLAVED AERATED CONCRETE BUILDING SYSTEMS DISTRIBUTOR**, Baltimore, USA, [online em 2003/11/04], http://www.curranaac.com.

Futureng (2003), **EMPRESA ESPECIALISTA DE PROJECTOS DE ESTRUTURAS EM AÇO LEVE**, Portugal, [online em 2003/04/04], http://www.futureng.com.

Gervásio, Helena; Santiago, Aldina; Silva, L. Simões; Bragança, Luís; Mendes, José (2002). **SAFETY AND FUNCTIONAL ASSESSEMENT OF MBT BUILDING SOLUTIONS IN VIEW OF SUSTAINABILITY**, Livro de Actas - Volume 3; XXX IAHS Word Congress on Housing - Housing Construction, An Interdisciplinary Task; University of Coimbra - Faculty of Sciences and Technology; Coimbra.

IBICT (2003). **CONSTRUÇÃO EM TAIPA DE MÃO**, Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, [online em 2003/04/04], http://brauna.ibict.br

Lourenço, Patrícia; Brito, Jorge de; Branco, Fernando (2001). **NOVAS TECNOLOGIAS NA APLICAÇÃO DE TERRA CRUA PARA A CONSTRUÇÃO**, Livro de Actas – Volume 1, Construção 2001 – Encontro Nacional da Construção, IST, Dezembro.

Lourenço, Patrícia (2002). **CONSTRUÇÕES EM TERRA – Uma aposta no desenvolvimento sustentável**, *in* Revista Arte & Construção, nº 144, págs. 20 a 26, Novembro.

PATH (2001), **AUTOCLAVED AERATED CONCRETE – An Overview**, Partnership for Advanced Tecnology in Housing, Washington D.C., USA. [online em 01/11/2003], http://www.pathnet.org.

Pinho, Fernando (2001). **PAREDES DE EDIFÍCIOS ANTIGOS EM PORTUGAL**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Rigassi, Vicent (1985). **COMPRESSED EARTH BLOCKS: Manual of Production**, Volume 1, Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - Gate, [online em 2003/11/13], http://www.gtz.de/basin/publications/books/CEBVol1.pdf.

Sousa, Hipólito (2002). **ALVENARIAS EM PORTUGAL – SITUAÇÃO ACTUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS**, Livro de Actas do Seminário Sobre Paredes de Alvenaria, Porto.

Simões, Duarte (2002). **CONTRIBUTO DA INOVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO SECTOR DOS EDIFÍCIOS – Perspectivas para as Empresas Portuguesas**, Tese de Mestrado, IST, Julho.

YTONG (2003), **FICHA TÉCNICA YTONG**, YTONG, Porto, Portugal, [online em: 2003/11/04], http://www.ytong.pt.

Parte III

APICER (1998), **MANUAL DE ALVENARIA DE TIJOLO**, Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica, Coimbra, 1998.

Berge, Bjorn (2000), **ECOLOGY OF BUILDING MATERIALS**, Architectural Press, England.

BRE (2004), **BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT ENVIRONMENTAL ASSESSMENT METHOD – BREEAM**, Building Research Establishment Ltd, England. [online em 02/04/2004], http://www.bre.co.uk.

Greenbuilding (2004), **GREEN BUILDING CHALLENGE - GBTool**. [online em 02/04/2004], http://greenbuilding.ca.

Meisser, Mathias, **ACUSTICA DE LOS EDIFÍCIOS**, Editores Técnicos Associados, S.A., Barcelona, 1973 – tradução do título original "La Pratique de L'Acoustique dans les Batiments", S.D.T.B.T.P., Paris.

Martin, A, J. (1995), **CONTROL OF NATURAL VENTILATION**, The Building Services Research and Information Association, Berkshire, UK.

Mateus, Diogo Manuel Rosa; Tadeu, António José Barreto (1999), **COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE EDIFÍCIOS**, Laboratório de Construções – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Patrício, Jorge (1999), **ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO – Metodologias de caracterização**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Pinheiro, Manuel Duarte (2003), **SISTEMAS DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL – Análise de Casos de Edifícios e Programas**, apontamentos apresentados no curso de Projecto e Avaliação Ambiental na Construção Sustentável, 10 e 11 de Dezembro de 2003, Fundec, IST.

Santos, C. A. Pina dos; Paiva, José A. Vasconcelos Paiva (1990), **COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DE ELEMENTOS DA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS**, LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1990.

USGBC (2004), **LEADERSHIP EN ENERGY & ENVIRONMENTAL DESIGN – LEED**, U. S. Green building Council. [online em 02/04/2004], http://www.usgbc.org.

GLOSSÁRIO

-C-

Condução: É a transferência de calor no seio de um corpo ou entre dois corpos em contacto directo. Essa transferência efectua-se sem a deslocação de matéria. O fluxo de calor no seio de um material depende da diferença de temperaturas verificada entre as faces do material e da sua condutibilidade térmica – λ (W/m.ºC).

Condutibilidade térmica (λ): É uma propriedade térmica típica de um material que é igual à quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma camada de espessura e área unitárias desse material por unidade de diferença de temperatura entre as suas duas faces.

Convecção: É a transferência de calor entre a superfície de um sólido e de um fluído líquido ou gasoso. Essa transferência é acompanhada por um deslocamento de matéria.

-E-

Eficácia luminosa η (fonte OSRAM Light@work glossary/dictionary em www.osram.com): A eficácia luminosa – η (lm/W) – exprime a eficiência com que a energia eléctrica é convertida em luz. Este factor pode atingir na teoria, quando toda a energia é convertida em luz visível, o valor máximo de 683 lm/W. Na prática, este factor assume valores na ordem dos 10 a 150 lm/W.

-F-

Factor de absorção energética dos envidraçados: É um factor que traduz, em relação ao fluxo energético total, a quantidade de energia que é absorvida pelo envidraçado.

Factor de reflexão energética dos envidraçados: É um factor que traduz, em relação ao fluxo energético total, a quantidade de energia que é reflectida.

Factor de reflexão luminoso: É um factor que traduz, em relação ao fluxo luminoso incidente, a quantidade de fluxo luminoso que é reflectido.

Factor solar: O factor solar de um vidro é a razão entre a energia total que entra num local através desse vidro e a energia solar incidente. Esta energia solar é a soma da energia solar que entra por transmissão directa com a energia transmitida para o ambiente interior pelo vidro após o seu aquecimento por absorção energética.

Factor de transmissão energética dos envidraçados: É um factor que traduz, em relação ao fluxo energético total, a quantidade de energia que é transmitida.

Factor de transmissão luminoso: É um factor que traduz, em relação ao fluxo luminoso incidente, a quantidade de fluxo luminoso que é transmitido.

-R-

Radiação: É a transferência de calor que resulta de uma troca de calor por radiação entre dois corpos que se encontram a temperaturas diferentes. Nas temperaturas ambientes, esta radiação situa-se nos infravermelhos, com comprimentos de onda superiores a 5 μm e é proporcional à emissividade dos corpos. A **emissividade** é uma característica da superfície dos corpos e quanto menor for a emissividade de um material, mais reduzida é a transferência de calor por radiação.

Reflectância (fonte OSRAM Light@work glossary/dictionary em www.osram.com): A reflectância é um factor que exprime a capacidade dos materiais em reflectir a luz. Esta propriedade é caracterizada através do factor de reflexão (ρ). Este factor expressa a relação entre o fluxo luminoso reflectido pelo material e o fluxo luminoso incidente ($\rho = \phi/\phi_0$).

O quadro seguinte apresenta a reflectância (ρ) de algumas materiais

Cor	ρ
Branco	0,8
Amarelo claro	0,7
Verde claro, rosa	0,4
Azul	0,4
Cizento claro	0,4
Castanho claro	0,3
Cinzento	0,2
Vermelho escuro	0,1
Preto	0,1

ANEXO I

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA PAVIMENTOS – CÁLCULO

1. PAVIMENTOS ALIGEIRADOS DE VIGOTAS PRÉ-ESFORÇADAS E BLOCOS CERÂMICOS DE COFRAGEM

1.1. Pavimento sem isolante térmico – solução construtiva de referência (Pav1)

1.1.1. Massa total e total de energia primária incorporada (PEC)

O quadro I.1 apresenta a massa total da solução e a energia primária total incorporada, por unidade de superfície de pavimento.

1.1.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n.w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f{=}500Hz) = 14{,}3x\log(m) + 11{,}1 = 14{,}3x\log 373{,}14 + 11{,}1 \approx 48\ dB$$

Quadro I.1 – Massa total e total de energia primária incorporada (PEC)

Material	Massa da solução (Kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)[1]	PEC da solução (kWh/m^2)
Betão	291,23(*)	0,28	81,54
Blocos cerâmicos	75,00(*)	0,83	62,25
Aço (100% reciclado)	6,91(**)	2,77	19,14
Total	**373,14**		**162,93**

(*) – Obtidos a partir de Documento de Homologação.
(**) – Inclui armadura das vigotas, armaduras de distribuição, nos apoios e nos tarugos.

1.2) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica e a respectiva redução sonora serão:

fc = 2000/21≈ 95Hz (Quebra a considerar em fc ≈ 8 dB)

1.3) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura I.1.

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$$D_{n,w} = 53 \text{ dB}$$

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

Com base no Método do Invariante (quadro 7.8), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$$D_{n,w} + L'_{n.w} = 128 \text{ dB} \Leftrightarrow$$

$$53 + L'_{n.w} = 128 \text{ dB} \Leftrightarrow$$

$$L'n_{,w} = 75 \text{ dB}$$

---

[1] Ver quadro 7.6.

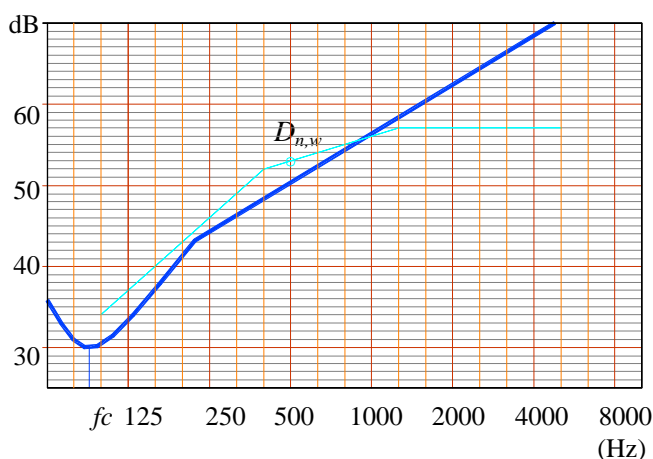



Figura I.1 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto numa laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas e abobadilhas cerâmicas (solução de referência)

1.1.3. Isolamento térmico

De acordo com valores fornecidos pelo LNEC, as resistências térmicas de um pavimento deste tipo são (Santos *et al*, 1990):

Fluxo ascendente: $R_{ta} = 0,25\ m^2.\ ºC/W$[1]

Fluxo descendente: $R_{td} = 0,27\ m^2.\ ºC/W$[1]

Assim, o **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6 para cada uma das direcções do fluxo de calor será:

$$\textit{Fluxo ascendente:}\quad U_a = \frac{1}{0{,}10 + 0{,}25 + 0{,}04} = 2{,}56\ W/m^2.{}^oC$$

$$\textit{Fluxo descendente:}\quad U_d = \frac{1}{0{,}17 + 0{,}27 + 0{,}04} = 2{,}08\ W/m^2.{}^oC$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

$\boldsymbol{U_{med} = 2{,}32\ W/\ m^2.\ ºC}$

[1] Considerando que os blocos cerâmicos apresentam três fiadas de furos.

1.1.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **35,45 €/m²**.

1.2. Pavimento com isolante térmico e tecto falso (Pav2)

1.2.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro I.2 apresenta a massa total da solução e a energia primária incorporada total, por unidade de superfície de pavimento.

Quadro I.2 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (kg/m²)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m²)
Betão	291,23(*)	0,28	84,55
Blocos cerâmicos	75,00(*)	0,83	62,25
Aço (100% reciclado)	6,91(**)	2,77	19,14
Lã de rocha	1,00	4,45	4,45
Gesso cartonado	11,25	1,39	15,64
Total	**385,39**		**186,03**

(*) – Obtidos a partir de Documento de Homologação.
(**) – Inclui armadura das vigotas, armaduras de distribuição, nos apoios e nos tarugos.

Como se pode observar no quadro I.2, a aplicação de um tecto falso, com as referidas características, resulta num acréscimo de massa (Δ_m) de 12,25 kg/m² e num acréscimo de PEC (Δ_{PEC}) de 21,09 kW.h/m², relativamente à solução construtiva anterior.

1.2.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.3, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f{=}500Hz) = 14{,}3x\log(385{,}39) + 11{,}1 + 4 \approx 52\ dB$$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação 7.2.4, a frequência de ressonância do conjunto será:

fr ≈ 61Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequências de ressonância da caixa-de-ar

Devido à existência de material absorvente na caixa-de-ar (lã de rocha) vai-se considerar desprezável a quebra de isolamento existente nas frequências de ressonância da caixa-de-ar.

1.4) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica correspondente a cada pano e a respectiva redução sonora serão:

fc1 = 2000/21≈ 95Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 8dB, porque fc1≠fc2)

fc2 = 4000/1,25 = 3200 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 7dB, porque fc1≠fc2)

1.5) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura I.2.

Considerado o traçado apresentado na figura I.2 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$\boldsymbol{D_{n,w} = 55\ dB}$

2.2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

Com base no Método do Invariante (quadro 7.8), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$D_{n,w} + L'_{n.w} = 128\ dB \Leftrightarrow$

$55 + L'_{n.w} = 128\ dB \Leftrightarrow \boldsymbol{L'n_{,w}} = 73\ dB$

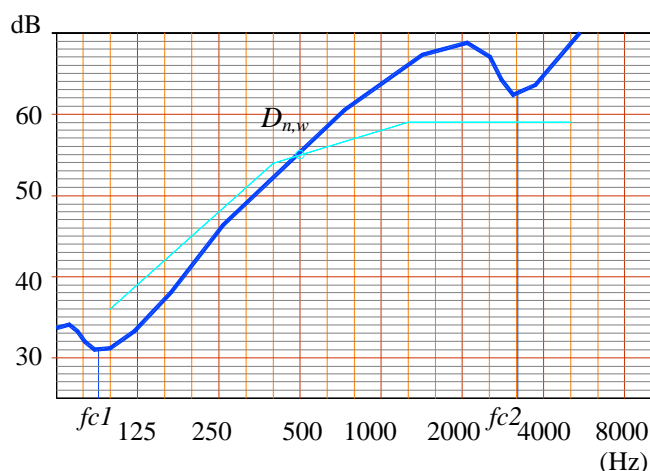



Figura I.2 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto numa laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas e abobadilhas cerâmicas, com tecto falso e isolante térmico no tardoz

1.2.3. Isolamento térmico

Somando aos valores obtidos na solução anterior a respectiva resistência térmica do ar, a resistência térmica da placa de gesso cartonado e a resistência térmica da manta de lã de rocha, obtém-se o valor do **coeficiente global de transmissão térmica** para cada uma das direcções através da equação 7.2.6:

Fluxo ascendente: $$U_a = \frac{1}{0{,}10 + 0{,}25 + \dfrac{0{,}025}{0{,}040} + \dfrac{0{,}0125}{0{,}35} + 0{,}14 + 0{,}04} = 0{,}84\, W/m^2.^{o}C$$

Fluxo descendente: $$U_d = \frac{1}{0{,}17 + 0{,}25 + \dfrac{0{,}025}{0{,}040} + \dfrac{0{,}0125}{0{,}35} + 0{,}21 + 0{,}04} = 0{,}75\, W/m^2.^{o}C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

$$U_{med} = 0{,}79\ W/m^2.\ ^{o}C$$

1.2.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **54,45 €/m²**.

1.2.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$I_m = \frac{385,39}{373,14} = 1,03$	$I_{PEC} = \frac{186,03}{162,73} = 1,14$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**)	iv) Índice de isolamento sons de percussão (**$I_{L'n,w}$**)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{55} = 0,96$	$I_{L'n,w} = \frac{73}{75} = 0,97$
v) Índice de transmissão térmica média (**I_{Umed}**)	vi) Índice de custo de construção (**I_{CC}**)
$I_{Umed} = \frac{0,79}{2,32} = 0,34$	$I_{CC} = \frac{54,45}{35,45} = 1,54$

1.3. Pavimento com isolante térmico, tecto falso e lajeta flutuante (Pav3)

1.3.1. Massa total e total de energia primária incorporada (PEC)

O quadro I.3 apresenta a massa total da solução e a energia primária incorporada total, por unidade de superfície de pavimento.

Como se pode observar no quadro I.3, a aplicação de uma lajeta flutuante com as referidas características, resulta num acréscimo de massa (Δ_m) de 35,70 kg/m^2 e num acréscimo de PEC (Δ_{PEC}) de 41,30 kW.h/m^2, relativamente à solução construtiva anterior.

Quadro I.3 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (Kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Betão	291,23(*)	0,28	84,55
Blocos cerâmicos	75,00(*)	0,83	62,25
Aço (100% reciclado)	6,91(**)	2,77	19,14
Lã de rocha	1,00	4,45	4,45
Gesso cartonado	11,25	1,39	15,64
Aglomerado de cortiça	5,60	1,11	6,22
Lâmina de polietileno	0,10	18,60	1,86
Betão leve	30,00	1,11	33,30
Total	**421,09**		**227,41**

(*) – Obtidos a partir de Documento de Homologação.
(**) – Inclui armadura das vigotas, armaduras de distribuição, nos apoios e nos tarugos.

1.3.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.3, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f=500Hz) = 14,3x\log 421,09 + 11,1 + 4 \approx 53\ dB$$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação 7.2.4, a frequência de ressonância do conjunto será:

$fr \approx 62,87$ Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequências de ressonância da caixa-de-ar

Devido à existência de material absorvente na caixa-de-ar (lã de rocha) vai-se considerar desprezável a quebra de isolamento existente nas frequências de ressonância da caixa-de-ar.

1.4) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica correspondente a cada pano e a respectiva redução sonora serão:

fc1 = 2000/21≈ 95Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 8dB, porque fc1≠fc2)

fc2 = 4000/1,25 = 3200 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 7dB, porque fc1≠fc2)

1.5) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura I.3.

Figura I.3 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto numa laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas e abobadilhas cerâmicas, com tecto falso e isolante térmico no tardoz, e lajeta flutuante em betão leve

Considerado o traçado apresentado na figura I.3 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$D_{n,w}$ = 56 dB

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

Com base no Método do Invariante (quadro 7.8), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$D_{n,w} + L'_{n.w} = 128\ dB \Leftrightarrow$

$56 + L'_{n.w} = 128\ dB \Leftrightarrow$

$L'_{n.w} = 72 dB$

Pelo facto desta solução construtiva compreender um elemento resiliente (aglomerado negro de cortiça) sob a base da lajeta flutuante, é possível reduzir-se em 18 dB o índice de isolamento sonoro a sons de percursão (Mateus, *et al*,1999) .

$\mathbf{L'_{n,w} = 72 - \Delta p} = 72 - 18 = \mathbf{54\ dB}$

1.3.3. Isolamento térmico

Somando aos valores obtidos na solução anterior as resistências térmicas do aglomerado negro de cortiça e da lajeta flutuante, obtém-se o valor do **coeficiente global de transmissão térmica** para cada uma das direcções do fluxo, através da equação 7.2.6:

Fluxo ascendente: $$U_a = \frac{1}{0{,}10 + 0{,}25 + \frac{0{,}025}{0{,}040} + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{0{,}25} + 0{,}14 + 0{,}04} \Leftrightarrow$$

$$U_a = 0{,}45\ W/m^2.^{\circ}C$$

Fluxo descendente: $$U_d = \frac{1}{0{,}17 + 0{,}25 + \frac{0{,}025}{0{,}040} + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{0{,}25} + 0{,}21 + 0{,}04} \Leftrightarrow$$

$$U_a = 0{,}42\ W/m^2.^{\circ}C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

$\mathbf{U_{med} = 0{,}44\ W/m^2.\ ^{\circ}C}$

1.3.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **68,00 €/m²**.

1.3.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (I_m)	ii) Índice de energia primária consumida (I_{PEC})
$I_m = \frac{421,09}{373,14} = 1,13$	$I_{PEC} = \frac{227,41}{162,73} = 1,40$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($I_{Dn,w}$)	iv) Índice de isolamento sons de percussão ($I_{L'n,w}$)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{56} = 0,95$	$I_{L'n,w} = \frac{54}{75} = 0,72$
v) Índice de transmissão térmica média (I_{Umed})	vi) Índice de custo de construção (I_{CC})
$I_{Umed} = \frac{0,44}{2,32} = 0,19$	$I_{CC} = \frac{68,00}{35,42} = 1,92$

2. PAVIMENTOS DE ESTRUTURA CONTÍNUA EM LAJE MACIÇA DE BETÃO ARMADO

2.1. Pavimento sem isolante térmico (Pav4)

2.1.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro I.4 apresenta a massa total da solução e a energia primária total incorporada, por unidade de superfície de pavimento.

Quadro I.4 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (Kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Betão	480,00	0,28	134,40
Aço (100% reciclado)	10,79(*)	2,77	29,89
Total	**490,79**		**164,29**

(*) – Inclui armadura principal, de distribuição e nos apoios.

2.1.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f=500Hz) = 14,3x\log 490,79 + 11,1 = 50\ dB$$

1.2) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica e a respectiva redução sonora serão:

$$fc = 1800/20 \approx 90Hz \text{ (quebra a considerar em } fc \approx 8 \text{ dB)}$$

1.3) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura I.4.

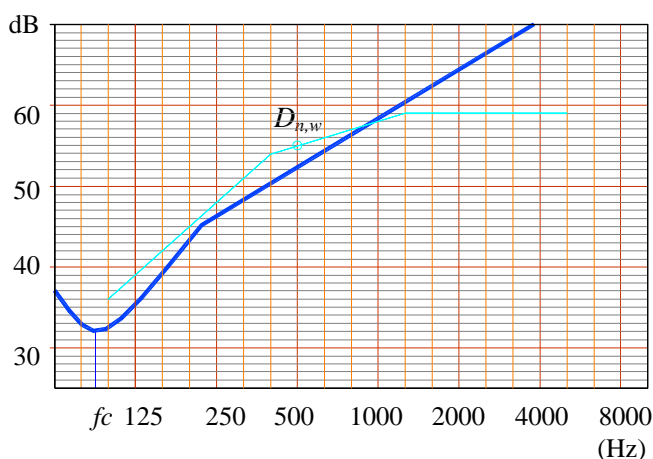



Figura I.4 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto numa laje maciça de betão armado com 20cm de espessura

Considerado o traçado apresentado na figura I.4 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$\boldsymbol{D_{n,w} = 55\ dB}$

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

Com base no Método do Invariante (quadro 7.8), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$D_{n,w} + L'_{n.w} = 133\ dB \Leftrightarrow$

$55 + L'_{n.w} = 133\ dB \Leftrightarrow \boldsymbol{L'_{n,w} = 78\ dB}$

2.1.3. Isolamento térmico

O **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6 para cada uma das direcções do fluxo de calor, será:

Fluxo ascendente: $$U_a = \frac{1}{0{,}10 + \frac{0{,}20}{1{,}75} + 0{,}04} = 3{,}93\ W/m^2.{}^oC$$

Fluxo descendente: $$U_d = \frac{1}{0{,}17 + \frac{0{,}20}{1{,}75} + 0{,}04} = 3{,}08\ W/m^2.{}^oC$$

Assim, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

$U_{med} = 3,51\ W/m^2.\ ºC$

2.1.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **47,89 €/m²**.

2.1.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (I_m)	ii) Índice de energia primária consumida (I_{PEC})
$I_m = \frac{490,79}{373,14} = 1,32$	$I_{PEC} = \frac{164,29}{162,73} = 1,01$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($I_{Dn,w}$)	iv) Índice de isolamento sons de percussão ($I_{L'n,w}$)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{55} = 0,96$	$I_{L'n,w} = \frac{78}{75} = 1,04$
v) Índice de transmissão térmica média (I_{Umed})	vi) Índice de custo de construção (I_{CC})
$I_{Umed} = \frac{3,51}{2,32} = 1,51$	$I_{CC} = \frac{47,89}{35,42} = 1,35$

2.2. Pavimento com tecto falso e isolante térmico (Pav5)

2.2.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Como se observou anteriormente, a aplicação de um tecto falso, com as referidas características, resulta num acréscimo de massa ($\Delta_{m(tecto\ falso)}$) de 12,25 kg/m² e num acréscimo de PEC ($\Delta_{PEC(tecto\ falso)}$) de 21,09 kW.h/m², relativamente à solução construtiva anterior.

Assim, a massa total e a PEC desta solução serão:

$m_{total} = 490,79 + \Delta_{m(tecto\ falso)} \Leftrightarrow 490,79 + 12,25 = \mathbf{503,04\ kg/m^2}$

$PEC_{total} = 164,29 + \Delta_{PEC(tecto\ falso)} \Leftrightarrow 164,29 + 21,09 = \mathbf{185,38\ kW.h/m2}$

2.2.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f=500Hz) = 14,3x\log 503,04 + 11,1 + 4 \approx 54\ dB$$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação 7.2.4, a frequência de ressonância do conjunto será:

fr ≈ 69 Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequências de ressonância da caixa-de-ar

Devido à existência de material absorvente na caixa-de-ar (lã de rocha) vai-se considerar desprezável a quebra de isolamento existente nas frequências de ressonância da caixa-de-ar.

1.4) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica correspondente a cada pano e a respectiva redução sonora serão:

fc1 = 1800/20≈ 90Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 8 dB, porque fc1≠fc2)

fc2 = 4000/1,25 = 3200 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 7 dB, porque fc1≠fc2)

1.5) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura I.5.

Figura I.5 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto numa laje maciça de betão armado com tecto falso e isolante térmico no tardoz

Considerado o traçado apresentado na figura I.5 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$\boldsymbol{D_{n,w} = 57\ dB}$

2) *Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)*

Com base no Método do Invariante (quadro 7.8), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$D_{n,w} + L'_{n.w} = 133\ dB \Leftrightarrow$

$57 + L'_{n.w} = 133\ dB \Leftrightarrow$

$\boldsymbol{L'_{n,w} = 76\ dB}$

2.2.3. Isolamento térmico

O **coeficiente global de transmissão térmica,** para cada uma das direcções do fluxo de calor, será:

Fluxo ascendente: $$U_a = \frac{1}{0{,}10 + \frac{0{,}20}{1{,}75} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + 0{,}14 + 0{,}04} = 0{,}95\ W/m^2.^{\circ}C$$

$$\textit{Fluxo descendente: } U_d = \frac{1}{0{,}17 + \frac{0{,}20}{1{,}75} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + 0{,}21 + 0{,}04} = 0{,}84\ W/m^2.^{o}C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

U_{med} = 0,90 W/ m². ºC

2.2.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **66,90 €/m²**.

2.2.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$I_m = \frac{503{,}04}{373{,}14} = 1{,}35$	$I_{PEC} = \frac{185{,}38}{162{,}73} = 1{,}14$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**)	iv) Índice de isolamento sons de percussão (**$I_{L'n,w}$**)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{57} = 0{,}93$	$I_{L'n,w} = \frac{76}{75} = 1{,}01$
v) Índice de transmissão térmica média (**I_{Umed}**)	vi) Índice de custo de construção (**I_{CC}**)
$I_{Umed} = \frac{0{,}90}{2{,}32} = 0{,}39$	$I_{CC} = \frac{66{,}90}{35{,}45} = 1{,}89$

2.3. Pavimento com isolante térmico, tecto falso e lajeta flutuante (Pav6)

2.3.1. Massa total e total de energia primária incorporada (PEC)

Como se observou anteriormente, a aplicação de uma lajeta flutuante com as referidas características, resulta num acréscimo de massa ($\Delta_{m(lajeta)}$) de 36,09 kg/m^2 e num acréscimo de PEC ($\Delta_{PEC(lajeta)}$) de 41,38 kW.h/m^2, relativamente à solução construtiva anterior.

Assim, a massa total e a PEC desta solução serão:

$$m_{total} = 503{,}04 + \Delta_{m(lajeta)} \Leftrightarrow 503{,}04 + 36{,}09 = \mathbf{539{,}13\ kg/m^2}$$

$$PEC_{total} = 185{,}38 + \Delta_{PEC(lajeta)} \Leftrightarrow 185{,}38 + 41{,}38 = \mathbf{226{,}76\ kW.h/m2}$$

2.3.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f=500Hz) = 14{,}3x\log 539{,}13 + 11{,}1 + 4 \approx 54\ dB$$

Como se pode verificar, o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea para a frequência de 500 Hz não varia em relação à solução construtiva anterior. Assim, este pavimento apresenta um comportamento a sons de condução aérea semelhante ao pavimento sem lajeta flutuante. O valor global de isolamento a sons de condução aérea será então:

$$\mathbf{D_{n,w} = 57\ dB}$$

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

Com base no Método do Invariante (quadro 7.8), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$$D_{n,w} + L'_{n.w} = 133\ dB \Leftrightarrow$$

$$57 + L'_{n.w} = 133\ dB \Leftrightarrow$$

$$L'_{n.w} = 76\ dB$$

Pelo facto desta solução construtiva compreender um elemento resiliente (aglomerado negro de cortiça) sob a base da lajeta flutuante, é possível reduzir-se em 18 dB o índice de isolamento sonoro a sons de percursão (Mateus, *et al*,1999) .

$L'n,w = 76 - \Delta_p \Leftrightarrow 76 - 18 = \mathbf{58\ dB}$

2.3.3. Isolamento térmico

O **coeficiente global de transmissão térmica,** para cada uma das direcções do fluxo de calor, será:

Fluxo ascendente: $$U_a = \frac{1}{0{,}10 + \frac{0{,}20}{1{,}75} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{0{,}25} + 0{,}14 + 0{,}04} \Leftrightarrow$$

$$U_a = 0{,}47\ W/m^2.{}^{o}C$$

Fluxo descendente: $$U_d = \frac{1}{0{,}17 + \frac{0{,}20}{1{,}75} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{0{,}25} + 0{,}21 + 0{,}04} \Leftrightarrow$$

$$U_a = 0{,}45\ W/m^2.{}^{o}C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

$\mathbf{U_{med} = 0{,}46\ W/m^2.\ {}^{o}C}$

2.3.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **80,50 €/m^2**.

2.3.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (I_m)	ii) Índice de energia primária consumida (I_{PEC})
$I_m = \frac{539,13}{373,14} = 1,44$	$I_{PEC} = \frac{226,76}{162,73} = 1,39$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($I_{Dn,w}$)	iv) Índice de isolamento sons de percussão ($I_{L'n,w}$)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{57} = 0,93$	$I_{L'n,w} = \frac{58}{75} = 0,77$
v) Índice de transmissão térmica média (I_{Umed})	vi) Índice de custo de construção (I_{CC})
$I_{Umed} = \frac{0,46}{2,32} = 0,20$	$I_{CC} = \frac{80,50}{35,45} = 2,27$

3. PAVIMENTOS EM PAINÉIS ALVEOLARES PREFABRICADOS DE BETÃO PRÉ-ESFORÇADO

3.1. Pavimento sem isolante térmico (Pav7)

3.1.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro I.5 apresenta a massa total da solução e a energia primária total incorporada, por unidade de superfície de pavimento.

Quadro I.5 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (Kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Betão	370,00(*)	0,28	103,60
Aço (100% reciclado)	6,94(**)	2,77	19,22
Total	**376,94**		**122,82**

(*) – Inclui betão nos painéis, betão complementar e nas juntas de solidarização.
(**) – Inclui armaduras dos painéis e armadura de distribuição.

3.1.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n.w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

R(f=500Hz) = 14,3xlog376,94+ 11,1 = 48 dB

1.2) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica e a respectiva redução sonora serão:

fc = 1800/20≈ 90Hz (Quebra a considerar em fc ≈ 8 dB)

1.3) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura I.6.

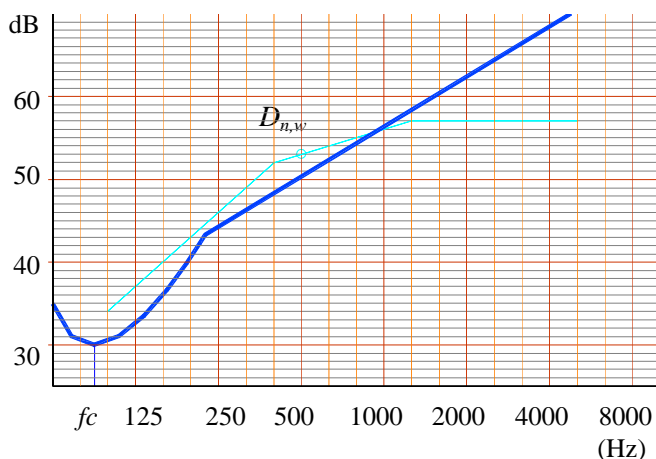



Figura I.6 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto num pavimento em painéis alveolares prefabricados de betão pré-esforçado, sem isolante térmico

Considerado o traçado apresentado na figura I.6 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$D_{n,w}$ = 53 dB

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

Com base no Método do Invariante (quadro 7.8), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$D_{n,w} + L'_{n.w} = 128\ dB \Leftrightarrow$

$53 + L'_{n.w} = 128\ dB \Leftrightarrow$ ***$L'_{n,w}$ = 75 dB***

3.1.3. Isolamento térmico

Neste tipo de pavimento existem zonas com resistências térmicas distintas: as zonas dos alvéolos e as dos septos. O coeficiente global de transmissão térmica será calculado através da média ponderada da resistência térmica existente em cada uma das zonas, supondo que a área de cada uma é semelhante

O **coeficiente global de transmissão térmica**, para cada uma das direcções do fluxo de calor, será:

Fluxo ascendente:

$$U_a = \frac{1}{\left(0{,}10 + \frac{0{,}20}{1{,}75} + 0{,}04\right)x0{,}5 + \left(0{,}10 + \frac{0{,}04}{1{,}75} + 0{,}14 + \frac{0{,}08}{1{,}75} + 0{,}04\right)x0{,}5} = 3{,}32 W/m^2.^oC$$

Fluxo descendente:

$$U_d = \frac{1}{\left(0{,}17 + \frac{0{,}20}{1{,}75} + 0{,}04\right)x0{,}5 + \left(0{,}17 + \frac{0{,}04}{1{,}75} + 0{,}21 + \frac{0{,}08}{1{,}75} + 0{,}04\right)x0{,}5} = 2{,}46\ W/m^2.^oC$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

U_{med} = 2,89 W/ m^2. ºC

3.1.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **113,50 €/m^2**.

3.1.5. Índices de comparação

ii) Índice de massa (I_m)	ii) Índice de energia primária consumida (I_{PEC})
$I_m = \frac{376,94}{373,14} = 1,01$	$I_{PEC} = \frac{122,82}{162,73} = 0,75$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($I_{Dn,w}$)	iv) Índice de isolamento sons de percussão ($I_{L'n,w}$)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{53} = 1,00$	$I_{L'n,w} = \frac{75}{75} = 1,00$
v) Índice de transmissão térmica média (I_{Umed})	vi) Índice de custo de construção (I_{CC})
$I_{Umed} = \frac{2,89}{2,32} = 1,25$	$I_{CC} = \frac{113,50}{35,45} = 3,20$

3.2. Pavimento com tecto falso e isolante térmico (Pav8)

3.2.1. Massa total e total de energia primária incorporada (PEC)

A massa total e a PEC desta solução são:

$$m_{total} = 376,94 + \Delta_{m(tecto\ falso)} \Leftrightarrow 376,94 + 12,25 = \mathbf{389,19\ kg/m^2}$$

$$PEC_{total} = 122,82 + \Delta_{PEC(tecto\ falso)} \Leftrightarrow 122,82 + 21,09 = \mathbf{143,91\ kW.h/m^2}$$

3.2.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f=500Hz) = 14,3x\log 389,19 + 11,1 + 4 \approx 52\ dB$$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação 7.2.4, a frequência de ressonância do conjunto será:

fr = 69 Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequências de ressonância da caixa-de-ar

Devido à existência de material absorvente na caixa-de-ar (lã de rocha) vai-se considerar desprezável a quebra de isolamento existente nas frequências de ressonância da caixa-de-ar.

1.4) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica correspondente a cada pano e a respectiva redução sonora serão:

$fc1 = 1800/20 \approx 90$Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 8 dB, porque $fc1 \neq fc2$)

$fc2 = 4000/1{,}25 = 3200$ Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 7 dB, porque $fc1 \neq fc2$)

1.5) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura I.7.

Considerado o traçado apresentado na figura I.7 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$D_{n,w} = 56$ dB

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

Com base no Método do Invariante (quadro 7.8), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$D_{n,w} + L'_{n.w} = 128$ dB $\Leftrightarrow$

$56 + L'_{n.w} = 128$ dB $\Leftrightarrow$

$L'_{n,w} = 72$ dB

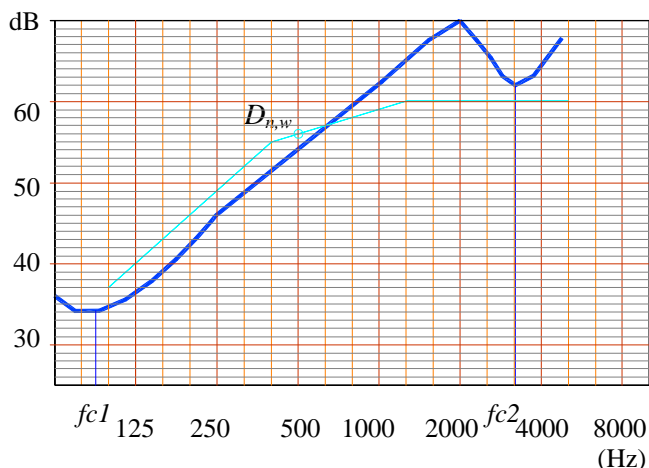



Figura I.7 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto num pavimento em painéis alveolares com tecto falso e isolante térmico

3.2.3. Isolamento térmico

O **coeficiente global de transmissão térmica,** para cada uma das direcções do fluxo de calor, será:

Fluxo ascendente:

$$U_a = \frac{1}{\left(0{,}25 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + 0{,}14\right) x0{,}5 + \left(0{,}35 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + 0{,}14\right) x0{,}5} \Leftrightarrow$$

$$U_a = 0{,}91\, W/m^2.^{\circ}C$$

Fluxo descendente:

$$U_d = \frac{1}{\left(0{,}32 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + 0{,}21\right) x0{,}5 + \left(0{,}49 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + 0{,}21\right) x0{,}5} \Leftrightarrow$$

$$U_d = 0{,}78\, W/m^2.^{\circ}C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

$\boldsymbol{U_{med} = 0{,}85\ W/m^2.\ ^{\circ}C}$

3.2.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **132,50 €/m²**.

3.2.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (I_m)	ii) Índice de energia primária consumida (I_{PEC})
$I_m = \frac{389{,}19}{373{,}14} = 1{,}04$	$I_{PEC} = \frac{143{,}91}{162{,}73} = 0{,}88$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($I_{Dn,w}$)	iv) Índice de isolamento sons de percussão ($I_{L'n,w}$)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{56} = 0{,}95$	$I_{L'n,w} = \frac{72}{75} = 0{,}96$
v) Índice de transmissão térmica média (I_{Umed})	vi) Índice de custo de construção (I_{CC})
$I_{Umed} = \frac{0{,}85}{2{,}32} = 0{,}37$	$I_{CC} = \frac{132{,}50}{35{,}45} = 3{,}74$

3.3. Pavimento com tecto falso, isolante térmico e lajeta flutuante (Pav9)

3.3.1. Massa total energia primária incorporada total (PEC)

A massa total e a PEC desta solução são:

$m_{total} = 389{,}19 + \Delta_{m(lajeta)} \Leftrightarrow 389{,}19 + 36{,}09 = \mathbf{425{,}28\ kg/m^2}$

$PEC_{total} = 143{,}91 + \Delta_{PEC(lajeta)} \Leftrightarrow 143{,}91 + 41{,}38 = \mathbf{185{,}19\ kW.h/m2}$

3.3.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$R(f{=}500Hz) = 14{,}3x\log 425{,}28 + 11{,}1 + 4 \approx 53\ dB$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação 7.2.4, a frequência de ressonância do conjunto será:

fr = 68,85 Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequências de ressonância da caixa-de-ar

Devido à existência de material absorvente na caixa-de-ar (lã de rocha) vai-se considerar desprezável a quebra de isolamento existente nas frequências de ressonância da caixa-de-ar.

1.4) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica correspondente a cada pano e a respectiva redução sonora serão:

fc1 = 1800/20≈ 90Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 8 dB, porque fc1≠fc2)

fc2 = 4000/1,25 = 3200 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 7 dB, porque fc1≠fc2)

1.5) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura I.8.

Figura I.8 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto num pavimento em painéis alveolares com tecto falso, isolante térmico e lajeta flutuante

Considerado o traçado apresentado na figura I.8 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$\boldsymbol{D_{n,w} = 57\ dB}$

2) *Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)*

Com base no Método do Invariante (tabela 7.1), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$D_{n,w} + L'_{n.w} = 128\ dB \Leftrightarrow$

$57 + L'_{n.w} = 128\ dB \Leftrightarrow$

$L'_{n.w} = 71\ dB$

Pelo facto desta solução construtiva compreender um elemento resiliente (aglomerado negro de cortiça) sob a base da lajeta flutuante, é possível reduzir-se em 18 dB o índice de isolamento sonoro a sons de percursão (Mateus, *et al*,1999) .

$L'_{n,w} = 71 - \Delta_p \Leftrightarrow 71 - 18 = \mathbf{53\ \ dB}$

3.3.3. Isolamento térmico

Somando aos valores obtidos na solução anterior as resistências térmicas do aglomerado negro de cortiça e da lajeta flutuante, obtém-se o valor do **coeficiente global de transmissão térmica** para cada uma das direcções do fluxo, através da equação 7.2.6:

Fluxo ascendente:

$$U_a = \frac{1}{\left(1{,}37 + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{1{,}75}\right)x0{,}5 + \left(1{,}15 + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{1{,}75}\right)x0{,}5} = 0{,}46 W/m^2.^{o}C$$

Fluxo descendente:

$$U_a = \frac{1}{\left(1{,}51 + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{1{,}75}\right)x0{,}5 + \left(1{,}36 + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{1{,}75}\right)x0{,}5} = 0{,}43 W/m^2.^{o}C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

$U_{med} = 0{,}45\ W/m^2.\ ^{o}C$

3.3.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **146,10 €/m²**.

3.3.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**) $I_m = \frac{389{,}19}{373{,}14} = 1{,}04$	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**) $I_{PEC} = \frac{226{,}76}{162{,}73} = 1{,}39$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**) $I_{Dn,w} = \frac{53}{57} = 0{,}93$	iv) Índice de isolamento sons de percussão (**$I_{L'n,w}$**) $I_{L'n,w} = \frac{53}{75} = 0{,}71$
v) Índice de transmissão térmica média (**I_{Umed}**) $I_{Umed} = \frac{0{,}45}{2{,}32} = 0{,}19$	vi) Índice de custo de construção (**I_{CC}**) $I_{CC} = \frac{146{,}10}{35{,}45} = 4{,}12$

4. PAVIMENTOS MISTOS DE COFRAGEM METÁLICA COLABORANTE

4.1. Pavimento sem isolante térmico (Pav10)

4.1.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro I.6 apresenta a massa total da solução e a energia primária total incorporada, por unidade de superfície de pavimento.

Quadro I.6 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (Kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Aço (100% reciclado)	27,15(*)	2,77	72,21
Betão	160,80	0,28	45,02
Total	**187,95**		**117,23**

(*) – Inclui aço dos painéis, dos perfis laminados e armadura de distribuição.

4.1.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.1, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

R(f=500Hz) = 13,3xlog187,95+ 13,4 = 44 dB

1.2) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica e a respectiva redução sonora serão:

fc = 1800/20≈ 90Hz (quebra a considerar em fc ≈ 8 dB)

1.3) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura I.9.

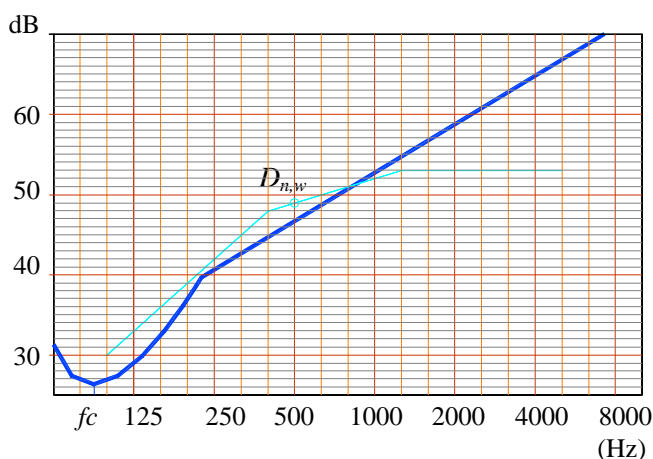



Figura I.9 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto num pavimento misto de cofragem metálica colaborante sem isolante térmico

Considerado o traçado apresentado na figura I.9 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$\boldsymbol{D_{n,w} = 49\ dB}$

2) *Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)*

Com base no Método do Invariante (tabela 7.1), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$D_{n,w} + L'_{n.w} = 133dB \Leftrightarrow$

$49 + L'_{n.w} = 133\ dB \Leftrightarrow$

$\boldsymbol{L'_{n,w} = 84\ dB}$

4.1.3. Isolamento térmico

Neste tipo de pavimento existem zonas com resistências térmicas distintas, em função da altura total do pavimento. O coeficiente global de transmissão térmica será calculado através da média pesada da resistência térmica existente em cada uma das zonas.

O **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6 para cada uma das direcções do fluxo de calor, será:

Fluxo ascendente:

$$U_a = \frac{1}{\left(0{,}10 + \frac{0{,}041}{1{,}75} + \frac{0{,}00075}{52} + 0{,}04\right)x0{,}7 + \left(0{,}10 + \frac{0{,}09925}{1{,}75} + \frac{0{,}00075}{52} + 0{,}04\right)x0{,}3} \Leftrightarrow$$

$$U_a = 5{,}77\ W/m^2.{}^{o}C$$

Fluxo descendente:

$$U_a = \frac{1}{\left(0{,}17 + \frac{0{,}041}{1{,}75} + \frac{0{,}00075}{52} + 0{,}04\right)x0{,}7 + \left(0{,}17 + \frac{0{,}09925}{1{,}75} + \frac{0{,}00075}{52} + 0{,}04\right)x0{,}3} \Leftrightarrow$$

$$U_d = 4{,}11\ W/m^2.{}^{o}C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

$\boldsymbol{U_{med} = 4{,}94\ W/\ m^2.\ {}^{o}C}$

4.1.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **66,45 €/m²**.

4.1.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$I_m = \frac{187{,}95}{373{,}14} = 0{,}51$	$I_{PEC} = \frac{117{,}23}{162{,}73} = 0{,}72$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**)	iv) Índice de isolamento sons de percussão (**$I_{L'n,w}$**)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{49} = 1{,}08$	$I_{L'n,w} = \frac{84}{75} = 1{,}12$
v) Índice de transmissão térmica média (**I_{Umed}**)	vi) Índice de custo de construção (**I_{CC}**)
$I_{Umed} = \frac{4{,}94}{2{,}32} = 2{,}13$	$I_{CC} = \frac{66{,}45}{35{,}45} = 1{,}87$

4.2. Pavimento com tecto falso e isolante térmico (Pav11)

4.2.1. Massa total e total de energia primária incorporada (PEC)

A massa total e a PEC desta solução são:

$$m_{total} = 187{,}95 + \Delta_{m(tecto\ falso)} \Leftrightarrow 187{,}95 + 12{,}25 = \mathbf{200{,}20\ kg/m^2}$$

$$PEC_{total} = 117{,}23 + \Delta_{PEC(tecto\ falso)} \Leftrightarrow 117{,}23 + 21{,}09 = \mathbf{138{,}22\ kW.h/m2}$$

4.2.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f{=}500Hz) = 14{,}3x\log 200{,}20 + 11{,}1 + 4 \approx 48\ dB$$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação 7.2.4, a frequência de ressonância do conjunto será:

fr ≈ 70,00 Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequências de ressonância da caixa-de-ar

Devido à existência de material absorvente na caixa-de-ar (lã de rocha) vai-se considerar desprezável a quebra de isolamento existente nas frequências de ressonância da caixa-de-ar.

1.4) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica correspondente a cada pano e a respectiva redução sonora serão:

fc1 = 1800/20≈ 90Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 8 dB, porque fc1≠fc2)

fc2 = 4000/1,25 = 3200 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 7 dB, porque fc1≠fc2)

1.5) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura I.10.

Figura I.10 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto num pavimento misto de cofragem metálica colaborante com tecto falso e isolante térmico no tardoz

Considerado o traçado apresentado na figura I.10 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$\boldsymbol{D_{n,w} = 52\ dB}$

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

Com base no Método do Invariante (tabela 7.1), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$D_{n,w} + L'_{n.w} = 133\ dB \Leftrightarrow$

$52 + L'_{n.w} = 133\ dB \Leftrightarrow$

$\boldsymbol{L'_{n,w} = 81\ dB}$

4.2.3. Isolamento térmico

Somando aos valores obtidos na solução anterior a respectiva resistência térmica do ar, a resistência térmica da placa de gesso cartonado e a resistência térmica da manta de lã de rocha, obtém-se o valor do **coeficiente global de transmissão térmica** para cada uma das direcções através da expressão 7.2.6:

Fluxo ascendente:

$$U_a = \frac{1}{\left(0{,}16 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + 0{,}14\right)x0{,}7 + \left(0{,}20 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + 0{,}14\right)x0{,}3} \Leftrightarrow$$

$$U_a = 1{,}03\, W / m^2 .^{o} C$$

Fluxo descendente:

$$U_d = \frac{1}{\left(0{,}23 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + 0{,}21\right)x0{,}5 + \left(0{,}27 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}025}{0{,}040} + 0{,}21\right)x0{,}5} \Leftrightarrow$$

$$U_d = 0{,}90\, W / m^2 .^{o} C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

$\boldsymbol{U_{med} = 0{,}95\ W/\ m^2.\ ^{o}C}$

4.2.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **85,45 €/m²**.

4.2.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**) $I_m = \frac{200{,}20}{373{,}14} = 0{,}54$	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**) $I_{PEC} = \frac{138{,}22}{162{,}73} = 0{,}85$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**) $I_{Dn,w} = \frac{54}{52} = 1{,}04$	iv) Índice de isolamento sons de percussão (**$I_{L'n,w}$**) $I_{L'n,w} = \frac{81}{75} = 1{,}08$
v) Índice de transmissão térmica média (**I_{Umed}**) $I_{Umed} = \frac{0{,}95}{2{,}32} = 0{,}41$	vi) Índice de custo de construção (**I_{CC}**) $I_{CC} = \frac{85{,}45}{35{,}45} = 2{,}41$

4.3. Pavimento com tecto falso, isolante térmico e lajeta flutuante (Pav12)

4.3.1. Massa total e total de energia primária incorporada (PEC)

A massa total e a PEC desta solução são:

$\boldsymbol{m_{total}} = 200{,}20 + \Delta_{m(lajeta)} \Leftrightarrow 200{,}20 + 36{,}09 = \mathbf{236{,}29\ kg/m^2}$

$\boldsymbol{PEC_{total}} = 138{,}22 + \Delta_{PEC(lajeta)} \Leftrightarrow 138{,}22 + 41{,}38 = \mathbf{179{,}60\ kW.h/m2}$

4.3.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$R(f{=}500Hz) = 14{,}3x\log 236{,}29 + 11{,}1 + 4 \approx 49\ dB$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

fr = 70,00 Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequências de ressonância da caixa-de-ar

Devido à existência de material absorvente na caixa-de-ar (lã de rocha) vai-se considerar desprezável a quebra de isolamento existente nas frequências de ressonância da caixa-de-ar.

1.4) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica correspondente a cada pano e a respectiva redução sonora serão:

fc1 = 1800/20≈ 90Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 8 dB, porque fc1≠fc2)

fc2 = 4000/1,25 = 3200 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 7 dB, porque fc1≠fc2)

1.5) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura I.11.

Figura I.11 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto num pavimento misto de cofragem metálica colaborante com tecto falso, isolante térmico e lajeta flutuante

Considerado o traçado apresentado na figura I.11 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$\mathbf{D_{n,w} = 54\ dB}$

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

Com base no Método do Invariante (tabela 7.1), o valor de $L'_{n.w}$ é estimado a partir do valor de $D_{n,w}$:

$D_{n,w} + L'_{n.w} = 133\ dB \Leftrightarrow$

$54 + L'_{n.w} = 133\ dB \Leftrightarrow$

$L'_{n.w} = 79\ dB$

Pelo facto desta solução construtiva compreender um elemento resiliente (aglomerado negro de cortiça) sob a base da lajeta flutuante, é possível reduzir-se em 18 dB o índice de isolamento sonoro a sons de percursão (Mateus, *et al*,1999) .

$\mathbf{L'n_{,}w} = 79 - \Delta_p \Leftrightarrow 79 - 18 = \mathbf{61\ \ dB}$

4.3.3. Isolamento térmico

Somando aos valores obtidos na solução anterior as resistências térmicas do aglomerado negro de cortiça e da lajeta flutuante, obtém-se o valor do **coeficiente global de transmissão térmica** para cada uma das direcções do fluxo, através da equação 7.2.6:

Fluxo ascendente:

$$U_a = \frac{1}{\left(0{,}96 + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{1{,}75}\right)x0{,}7 + \left(1{,}00 + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{1{,}75}\right)x0{,}3} = 0{,}53 W/m^2.^{o}C$$

Fluxo descendente:

$$U_a = \frac{1}{\left(1{,}10 + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{1{,}75}\right)x0{,}7 + \left(1{,}14 + \frac{0{,}04}{0{,}045} + \frac{0{,}04}{1{,}75}\right)x0{,}3} = 0{,}49 W/m^2.^{o}C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

U_{med} = 0,50 W/ m². ºC

4.3.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **99,05 €/m²**.

4.3.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$I_m = \frac{236{,}29}{373{,}14} = 0{,}63$	$I_{PEC} = \frac{179{,}60}{162{,}73} = 1{,}10$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**)	iv) Índice de isolamento sons de percussão (**$I_{L'n,w}$**)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{54} = 0{,}98$	$I_{L'n,w} = \frac{61}{75} = 0{,}81$
v) Índice de transmissão térmica média (**I_{Umed}**)	vi) Índice de custo de construção (**I_{CC}**)
$I_{Umed} = \frac{0{,}50}{2{,}32} = 0{,}22$	$I_{CC} = \frac{99{,}05}{35{,}45} = 2{,}79$

5. PAVIMENTOS EM ESTRUTURA DESCONTÍNUA DE MADEIRA

5.1. Pavimento sem isolante térmico (Pav13)

5.1.1. Massa total e total de energia primária incorporada (PEC)

O quadro I.7 apresenta a massa total da solução e a energia primária total incorporada, por unidade de superfície de pavimento.

Quadro I.7 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (Kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Madeira	36,75	0,83	30,50
Gesso cartonado	11,25	1,39	15,64
Total	**48,00**		**46,14**

5.1.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

De acordo com resultados experimentais, obtidos em laboratório certificado, o índice de isolamento a sons de condução aérea será:

$D_{n,w} = 38\ dB$

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

De acordo com resultados experimentais, obtidos em laboratório certificado, o índice de isolamento sonoro a sons percussão será:

$L'_{n,w} = 83\ dB$

5.1.3. Isolamento térmico

Tendo em conta a possibilidade do ar circular na zona de contacto das vigas com o soalho, ignorou-se a contribuição das vigas no coeficiente global de transmissão térmica.

O **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6 para cada uma das direcções do fluxo de calor, será:

Fluxo ascendente:

$$U_a = \frac{1}{0{,}10 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + 0{,}14 + \frac{0{,}018}{0{,}12} + 0{,}04} = 2{,}15 W/m^2.^{o}C$$

Fluxo descendente:

$$U_a = \frac{1}{0{,}17 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + 0{,}21 + \frac{0{,}018}{0{,}12} + 0{,}04} = 1{,}65 W/m^2.^{o}C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

U_{med} = 1,90 W/ m^2. ºC

5.1.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **166,80 €/m^2**.

5.1.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$I_m = \frac{48{,}00}{373{,}14} = 0{,}13$	$I_{PEC} = \frac{46{,}14}{162{,}73} = 0{,}28$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**)	iv) Índice de isolamento sons de percussão (**$I_{L'n,w}$**)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{38} = 1{,}39$	$I_{L'n,w} = \frac{83}{75} = 1{,}11$
v) Índice de transmissão térmica média (**I_{Umed}**)	vi) Índice de custo de construção (**I_{CC}**)
$I_{Umed} = \frac{1{,}90}{2{,}32} = 2{,}82$	$I_{CC} = \frac{166{,}80}{35{,}45} = 4{,}71$

5.2. Pavimento com tecto falso e isolante (Pav14)

5.2.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro I.8 apresenta a massa total da solução e a energia primária total incorporada, por unidade de superfície de pavimento.

Quadro I.8 – Massa total e total de energia primária incorporada (PEC)

Material	Massa da solução (Kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Madeira	36,75	0,83	30,50
Gesso cartonado	22,50	1,39	31,28
Lã de rocha	3,2	4,45	14,24
Total	**62,45**		**76,02**

5.2.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n.w}$)

De acordo com resultados experimentais, obtidos em laboratório certificado, o índice de isolamento a sons de condução aérea será:

$$D_{n,w} = 63\ dB$$

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

De acordo com resultados experimentais, obtidos em laboratório certificado, o índice de isolamento sonoro a sons percussão será:

$$L'_{n,w} = 56\ dB$$

5.2.3. Isolamento térmico

Tendo em conta a possibilidade do ar circular na zona de contacto das vigas com o soalho, ignorou-se a contribuição das vigas no coeficiente global de transmissão térmica.

O **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6 para cada uma das direcções do fluxo de calor, será:

Fluxo ascendente:

$$U_a = \frac{1}{0{,}10 + \frac{0{,}025}{0{,}35} + \frac{0{,}08}{0{,}040} + 0{,}14 + \frac{0{,}018}{0{,}12} + 0{,}04} = 0{,}40 W/m^2.^{o}C$$

Fluxo descendente:

$$U_a = \frac{1}{0{,}17 + \frac{0{,}025}{0{,}35} + \frac{0{,}08}{0{,}040} + 0{,}21 + \frac{0{,}018}{0{,}12} + 0{,}04} = 0{,}38 W/m^2.^{o}C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

U_{med} = 0,39 W/ m^2. ºC

5.2.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **199,20 €/m^2**.

5.2.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**) $I_m = \frac{62{,}45}{373{,}14} = 0{,}17$	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**) $I_{PEC} = \frac{76{,}02}{162{,}73} = 0{,}47$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**) $I_{Dn,w} = \frac{53}{63} = 0{,}84$	iv) Índice de isolamento sons de percussão (**$I_{L'n,w}$**) $I_{L'n,w} = \frac{56}{75} = 0{,}75$
v) Índice de transmissão térmica média (**I_{Umed}**) $I_{Umed} = \frac{0{,}39}{2{,}32} = 0{,}17$	vi) Índice de custo de construção (**I_{CC}**) $I_{CC} = \frac{199{,}20}{35{,}45} = 5{,}62$

5.3. Pavimento com isolante térmico e revestimento flutuante não estrutural (Pav15)

5.3.1. Massa total e total de energia primária incorporada (PEC)

O quadro I.9 apresenta a massa total da solução e a energia primária total incorporada, por unidade de superfície de pavimento.

Quadro I.9 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (Kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Madeira	38,50	0,83	31,96
Gesso cartonado	11,25	1,39	15,64
Lã de rocha	1,80	4,45	8,01
Lâmina de polietileno	0,09	18,60	1,75
Total	**51,64**		**57,36**

5.3.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n.w}$)

De acordo com resultados experimentais, obtidos em laboratório certificado, o índice de isolamento a sons de condução aérea será:

$$D_{n,w} = 54 \text{ dB}$$

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

De acordo com resultados experimentais, obtidos em laboratório certificado, o índice de isolamento sonoro a sons percussão será:

$$L'_{n,w} = 58 \text{ dB}$$

5.3.3. Isolamento térmico

Tendo em conta a possibilidade do ar circular na zona de contacto das vigas com o soalho, ignorou-se a contribuição das vigas no coeficiente global de transmissão térmica.
O **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6 para cada uma das direcções do fluxo de calor, será:

Fluxo ascendente:

$$U_a = \frac{1}{0{,}10 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}08}{0{,}040} + 0{,}14 + \frac{0{,}018}{0{,}12} + \frac{0{,}001}{0{,}40} + \frac{0{,}005}{0{,}12} + 0{,}04} = 0{,}40 W/m^2.^oC$$

Fluxo descendente:

$$U_a = \frac{1}{0{,}17 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}08}{0{,}040} + 0{,}21 + \frac{0{,}018}{0{,}12} + \frac{0{,}001}{0{,}40} + \frac{0{,}005}{0{,}12} + 0{,}04} = 0{,}34 W/m^2.^oC$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

U_{med} = 0,37 W/ m^2. ºC

5.3.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **199,25 €/m^2**.

5.3.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$I_m = \frac{51{,}64}{373{,}14} = 0{,}14$	$I_{PEC} = \frac{57{,}36}{162{,}73} = 0{,}35$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**)	iv) Índice de isolamento sons de percussão (**$I_{L'n,w}$**)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{54} = 0{,}98$	$I_{L'n,w} = \frac{58}{75} = 0{,}77$
v) Índice de transmissão térmica média (**I_{Umed}**)	vi) Índice de custo de construção (**I_{CC}**)
$I_{Umed} = \frac{0{,}37}{2{,}32} = 0{,}16$	$I_{CC} = \frac{199{,}25}{35{,}45} = 5{,}62$

5.4. Pavimento com isolante térmico e revestimento estrutural flutuante (Pav16)

5.4.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro I.10 apresenta a massa total da solução e a energia primária total incorporada, por unidade de superfície de pavimento.

Quadro I.10 – Massa total e total de energia primária incorporada (PEC)

Material	Massa da solução (Kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Madeira	36,75	0,83	30,50
Gesso cartonado	11,25	1,39	15,64
Lã de rocha	1,80	4,45	8,01
Lâmina de polietileno	0,09	18,60	1,75
Total	**49,89**		**55,90**

5.4.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n.w}$)

De acordo com resultados experimentais, obtidos em laboratório certificado, o índice de isolamento a sons de condução aérea será:

$$D_{n,w} = 50 \text{ dB}$$

2) Índice de isolamento sonoro a sons de percursão ($L'_{n,w}$)

De acordo com resultados experimentais, obtidos em laboratório certificado, o índice de isolamento sonoro a sons percussão será:

$$L'_{n,w} = 63 \text{ dB}$$

5.4.3. Isolamento térmico

Tendo em conta a possibilidade do ar circular na zona de contacto das vigas com o soalho, ignorou-se a contribuição das vigas no coeficiente global de transmissão térmica.

O **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6 para cada uma das direcções do fluxo de calor, será:

Fluxo ascendente:

$$U_a = \frac{1}{0{,}10 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}08}{0{,}040} + 0{,}14 + \frac{0{,}001}{0{,}40} + \frac{0{,}018}{0{,}12} + 0{,}04} = 0{,}41 W/m^2.{}^{o}C$$

Fluxo descendente:

$$U_a = \frac{1}{0{,}17 + \frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}08}{0{,}040} + 0{,}21 + \frac{0{,}001}{0{,}40} + \frac{0{,}018}{0{,}12} + 0{,}04} = 0{,}38 W/m^2.{}^{o}C$$

Logo, o **coeficiente global médio de transmissão térmica** será:

$\boldsymbol{U_{med} = 0{,}40\ W/m^2.\ {}^{o}C}$

5.4.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **181,75 €/m²**.

5.4.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$I_m = \frac{49{,}89}{373{,}14} = 0{,}13$	$I_{PEC} = \frac{55{,}90}{162{,}73} = 0{,}34$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**)	iv) Índice de isolamento sons de percussão (**$I_{L'n,w}$**)
$I_{Dn,w} = \frac{53}{50} = 1{,}06$	$I_{L'n,w} = \frac{63}{75} = 0{,}84$
v) Índice de transmissão térmica média (**I_{Umed}**)	vi) Índice de custo de construção (**I_{CC}**)
$I_{Umed} = \frac{0{,}40}{2{,}32} = 0{,}17$	$I_{CC} = \frac{181{,}75}{35{,}45} = 5{,}13$

ANEXO II

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA PAREDES – CÁLCULO

1. PAREDE DUPLA EM ALVENARIA DE TIJOLO FURADO, COM ISOLANTE TÉRMICO PREENCHENDO PARCIALMENTE A CAIXA-DE-AR – SOLUÇÃO DE REFERÊNCIA (PAR1)

1.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro II.1 apresenta a massa total da solução e a energia primária incorporada total, por unidade de superfície de parede.

Quadro II.1 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Argamassa de assentamento (*)	26,48	0,28	7,41
Argamassa de reboco	58,50	0,28	16,38
Poliestireno expandido extrudido (XPS)	0,65	20,00	13,00
Tijolos	193,44	0,83	160,56
Total	**279,07**		**197,35**

(*) – Foram consideradas juntas verticais e horizontais com 1cm de espessura.

1.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n.w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

R(f=500Hz) = 14,3xlog(279,07) + 11,1 + 4 ≈ 50 dB

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação 7.2.4, a frequência de ressonância do conjunto será:

fr = 71,43 Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequências de ressonância da caixa-de-ar

Neste estudo consideraram-se desprezáveis as quebras de isolamento existentes nas frequências de ressonância da caixa-de-ar.

1.4) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica correspondente a cada pano e a respectiva redução sonora serão:

fc1 = 2000/15≈ 133Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 8dB, porque fc1≠fc2).

fc2 = 2000/11 = 182 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB.

1.5) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura II.2.

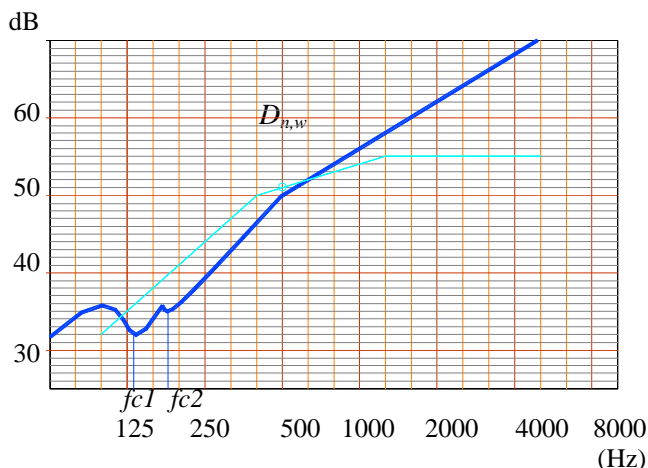



Figura II.1 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto numa parede dupla de tijolo furado com isolante térmico preenchendo parcialmente a caixa-de-ar (Par1)

Considerado o traçado apresentado na figura II.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$\boldsymbol{D_{n,w} = 51\ dB}$

1.3. Isolamento térmico

Considerando o valor da resistência térmica de cada um dos panos de tijolo vazado, apresentados no quadro II.2, a resistência térmica superficial interior e exterior, a do reboco interior e exterior, a do espaço de ar e a do isolante térmico, obtém-se o valor do **coeficiente global de transmissão térmica** através da equação 7.2.6:

$$U = \frac{1}{0{,}04 + \frac{0{,}015}{1{,}15} + 0{,}31 + 0{,}16 + \frac{0{,}02}{0{,}035} + 0{,}21 + \frac{0{,}015}{1{,}15} + 0{,}12} = 0{,}70\ W / m^2.^{o}C$$

Quadro II.2 – Resistências térmicas (R_t) de paredes simples de alvenaria de tijolo furado (Santos *et al*, 1990)

Espessura	R_t ($m^2.^oC/W$)
7cm	0,15
11cm	0,21
15cm	0,31
22cm	0,46

1.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **46,68 €/m^2**.

2. PAREDE DUPLA COM PANO EXTERIOR EM ALVENARIA DE PEDRA APARELHADA COM FACE À VISTA E PANO INTERIOR EM ALVENARIA DE TIJOLO FURADO, COM ISOLANTE PREENCHENDO PARCIALMENTE A CAIXA-DE-AR (PAR2)

2.1.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro II.3 apresenta a massa total da solução e a energia primária incorporada total, por unidade de superfície de parede.

Quadro II.3 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Argamassa de assentamento	180,38	0,28	50,51
Argamassa de reboco	29,25	0,28	8,19
Pedra	610,35	0,03	18,31
Poliestireno expandido extrudido (XPS)	0,98	20,00	19,60
Tijolo	87,57	0,83	72,68
Total	**908,53**		**169,29**

2.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f=500Hz) = 14,3x\log(906,53) + 11,1 + 4 \approx 57\ dB$$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação 7.2.4, a frequência de ressonância do conjunto será:

fr ≈ 57 Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica correspondente a cada pano e a respectiva redução sonora serão:

fc1 = 1800/30 ≈ 60 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 8 dB, porque fc1≠fc2).

fc2 = 2000/11 ≈ 182 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB.

1.4) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura II.2.

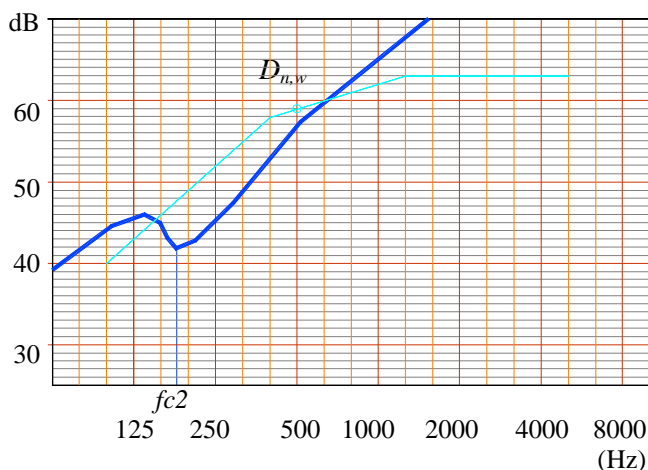



Figura II.2 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto numa parede dupla com pano exterior em alvenaria de pedra aparelhada com face à vista e pano interior em alvenaria de tijolo furado, com isolante preenchendo parcialmente a caixa-de-ar (Par2)

Considerado o traçado apresentado na figura I.2 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$D_{n,w}$ = 59 dB

2.3. Isolamento térmico

Considerando a resistência térmica dos diversos materiais que compõem a solução, bem com as resistências térmicas superficiais interior e exterior, **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6, será:

$$U = \frac{1}{0{,}04 + \frac{0{,}30}{3{,}0} + 0{,}16 + \frac{0{,}02}{0{,}035} + 0{,}21 + \frac{0{,}015}{1{,}15} + 0{,}12} = 0{,}67\, W / m^2.^{\circ}C$$

2.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **125,92 €/m²**.

2.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$I_m = \frac{908{,}53}{279{,}07} = 3{,}26$	$I_{PEC} = \frac{169{,}29}{197{,}35} = 0{,}86$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**) $I_{Dn,w} = \frac{51}{59} = 0{,}86$	iv) Índice de transmissão térmica (**I_U**) $I_U = \frac{0{,}66}{0{,}70} = 0{,}94$
v) Índice de espaço ocupado (**I_{eo}**) $I_{eo} = \frac{47{,}50}{33{,}00} = 1{,}44$	vi) Índice de custo de construção (**I_{cc}**) $I_{cc} = \frac{125{,}92}{46{,}68} = 2{,}30$

3. PAREDE SIMPLES EM ALVENARIA DE TIJOLO FURADO COM ISOLAMENTO CONTÍNUO PELO EXTERIOR (PAR3)

3.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro II.4 apresenta a massa total da solução e a energia primária incorporada total, por unidade de superfície de parede.

3.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n.w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f{=}500Hz) = 14{,}3x\log(220{,}15) + 11{,}1 \approx 45\ dB$$

Quadro II.4 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Argamassa de assentamento	21,45	0,28	6,00
Argamassa de reboco	48,75	0,28	13,65
Poliestireno expandido moldado (EPS)	0,80	20,00	16,00
Tijolo	149,15	0,83	123,79
Total	**220,15**		**159,44**

1.2) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica e a respectiva redução sonora serão:

$fc = 2000/22 \approx$ 90Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 9 dB.

1.3) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura II.3.

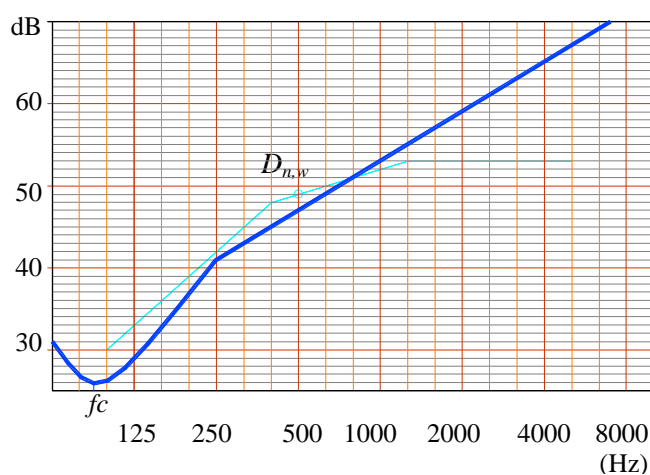



Figura II.3 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto numa parede simples em alvenaria de tijolo furado com isolamento contínuo pelo exterior (Par3)

Considerado o traçado apresentado na figura II.3 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$\boldsymbol{D_{n,w} = 49\ dB}$

3.3. Isolamento térmico

Considerando a resistência térmica dos diversos materiais que compõem a solução, bem com as resistências térmicas superficiais interior e exterior, **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6, será:

$$U = \frac{1}{0{,}04 + \frac{0{,}01}{1{,}15} + \frac{0{,}040}{0{,}040} + 0{,}46 + \frac{0{,}015}{1{,}15} + 0{,}12} = 0{,}61\, W / m^2.^{\circ}C$$

3.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **41,75 €/m²**.

3.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$$I_m = \frac{220,15}{279,07} = 0,79$$	$$I_{PEC} = \frac{159,44}{197,35} = 0,81$$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**) $$I_{Dn,w} = \frac{51}{49} = 1,04$$	iv) Índice de transmissão térmica (**I_U**) $$I_U = \frac{0,61}{0,70} = 0,87$$
v) Índice de espaço ocupado (**I_{eo}**) $$I_{eo} = \frac{28,50}{33,00} = 0,86$$	vi) Índice de custo de construção (**I_{cc}**) $$I_{cc} = \frac{41,75}{46,68} = 0,89$$

4. PAREDE DUPLA COM PANO EXTERIOR EM ALVENARIA DE TIJOLO MACIÇO COM FACE À VISTA E PANO INTERIOR EM ALVENARIA DE BLOCOS DE BETÃO CELULAR AUTOCLAVADO (PAR4)

4.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro II.5 apresenta a massa total da solução e a energia primária incorporada total, por unidade de superfície de parede.

Quadro II.5 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Argamassa de assentamento	13,52	0,28	3,79
Argamassa de reboco	29,25	0,28	8,19
Bloco de betão celular autoclavado	126,00	1,11	139,86
Tijolo	111,00	0,83	92,13
Total	**279,77**		**243,97**

4.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f=500Hz) = 14{,}3 x \log(279{,}77) + 11{,}1 + 4 \approx 50 \text{ dB}$$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação 7.2.4, a frequência de ressonância do conjunto será:

fr ≈ 53 Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica correspondente a cada pano e a respectiva redução sonora serão:

fc1 =3200/17,5 ≈ 182 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 9 dB, porque fc1≠fc2).

fc2 = 3000/7 ≈ 429 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB.

1.4) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura II.4.

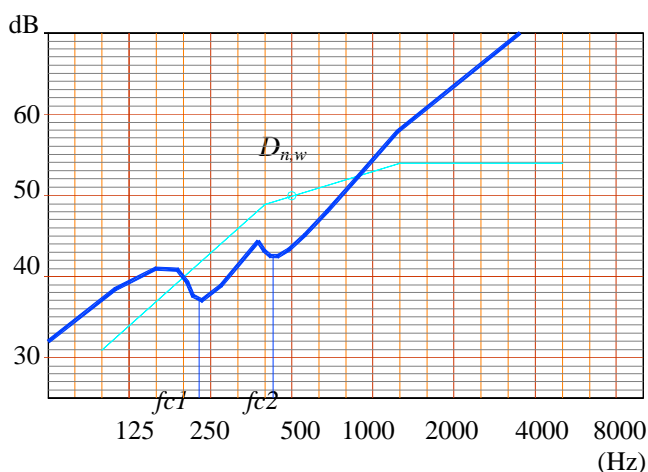



Figura II.4 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto numa parede dupla com pano exterior em alvenaria de tijolo maciço com face à vista e pano interior em alvenaria de blocos de betão celular autoclavado (Par4)

Considerado o traçado apresentado na figura II.4 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$D_{n,w}$ = 50 dB

4.3. Isolamento térmico

Considerando a resistência térmica dos diversos materiais que compõem a solução, bem com as resistências térmicas superficiais interior e exterior, **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6, será:

$$U = \frac{1}{0{,}04 + 0{,}11 + 0{,}16 + \frac{0{,}175}{0{,}16} + 0{,}12} = 0{,}66\ W/m^2.^oC$$

4.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **77,35 €/m²**.

4.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$I_m = \frac{279{,}77}{279{,}07} = 1{,}00$	$I_{PEC} = \frac{243{,}97}{197{,}35} = 1{,}24$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**)	iv) Índice de transmissão térmica (**I_U**)
$I_{Dn,w} = \frac{51}{50} = 1{,}02$	$I_U = \frac{0{,}66}{0{,}70} = 0{,}94$
v) Índice de espaço ocupado (**I_{eo}**)	vi) Índice de custo de construção (**I_{cc}**)
$I_{eo} = \frac{28{,}00}{33{,}00} = 0{,}85$	$I_{cc} = \frac{77{,}55}{46{,}68} = 1{,}66$

5. PAREDE VENTILADA COM ELEMENTO DE SUPORTE EM BLOCOS DE BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA, COM ISOLANTE CONTÍNUO PELO EXTERIOR E REVESTIMENTO DESCONTÍNUO EM MATERIAL CERÂMICO (PAR5)

5.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro II.6 apresenta a massa total da solução e a energia primária incorporada total, por unidade de superfície de parede.

Quadro II.6 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Aço	3,10	2,77	8,59
Aglomerado negro de cortiça	3,50	1,11	3,89
Argamassa de assentamento	29,70	0,28	8,32
Argamassa de reboco	29,25	0,28	8,19
Betão argila expandida	134,26	1,11	149,03
Revestimento cerâmico	25,00	2,22	55,50
Total	**224,81**		**233,52**

5.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

De acordo com a equação 7.2.2, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f=500Hz) = 14{,}3x\log(224{,}81) + 11{,}1 + 4 \approx 49\ dB$$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação 7.2.4, a frequência de ressonância do conjunto será:

fr ≈ 56 Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequência crítica

fc1 =3200[1]/20 ≈ 160 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 9 dB, porque fc1≠fc2).

fc2 = 3000/1 ≈ 3000 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB.

1.4) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura II.5.

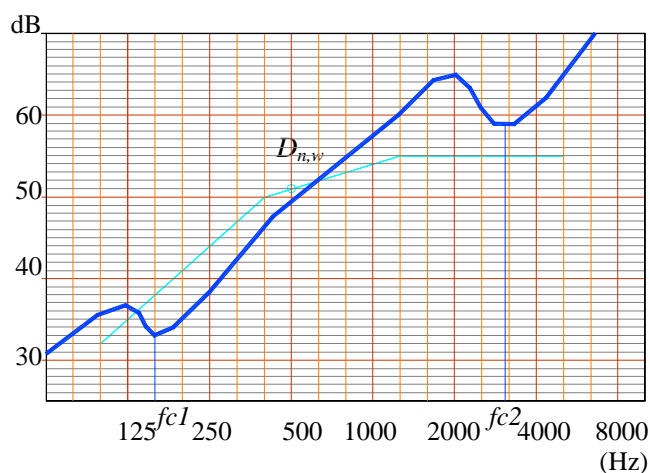



Figura II.5 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto numa parede ventilada, com elemento de suporte em blocos de betão de argila expandida com isolante contínuo pelo exterior e revestimento descontínuo cerâmico (Par5)

---

[1] Atendendo à semelhança da massa volúmica aparente, considerou-se uma frequência crítica igual à do betão celular autoclavado.

Considerado o traçado apresentado na figura II.5 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$D_{n,w} = 51\ dB$

5.3. Isolamento térmico

Considerando a resistência térmica dos diversos materiais que compõem a solução, bem com as resistências térmicas superficiais interior e exterior, **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6, será:

$$U = \frac{1}{0{,}04 + \frac{0{,}025}{0{,}045} + 0{,}77 + \frac{0{,}015}{1{,}15} + 0{,}12} = 0{,}67\ W/m^2.{}^{o}C$$

5.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **135,80 €/m²**.

5.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$I_m = \frac{224{,}81}{279{,}07} = 0{,}81$	$I_{PEC} = \frac{233{,}52}{197{,}35} = 1{,}18$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**)	iv) Índice de transmissão térmica (**I_U**)
$I_{Dn,w} = \frac{51}{51} = 1{,}00$	$I_U = \frac{0{,}67}{0{,}70} = 0{,}96$
v) Índice de espaço ocupado (**I_{eo}**)	vi) Índice de custo de construção (**I_{cc}**)
$I_{eo} = \frac{35{,}02}{33{,}00} = 1{,}06$	$I_{cc} = \frac{135{,}80}{46{,}68} = 2{,}91$

6. PAREDE TIPO SANDUÍCHE, COM ESTRUTURA DE AÇO LEVE (PAR6)

6.1. Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

O quadro II.7 apresenta a massa total da solução e a energia primária incorporada total, por unidade de superfície de parede.

Quadro II.7 – Massa total e energia primária incorporada total (PEC)

Material	Massa da solução (kg/m^2)	PEC (kWh/Kg)	PEC da solução (kWh/m^2)
Aço (100% reciclado)	19,45	2,77	53,87
Argamassa de reboco	19,50	0,28	5,46
Aglomerado de fibras de madeira (OSB)	11,10	4,17	46,29
Lã de rocha	5,60	4,45	24,92
Gesso cartonado	19,40	1,39	26,97
Poliestireno expandido moldado (EPS)	0,65	20,00	13,00
Total	**75,70**		**170,51**

6.2. Isolamento sonoro

1) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n.w}$)

1.1) Aplicação da Lei da Massa

Desprezando a contribuição da massa da estrutura (aço) no isolamento sonoro, de acordo com a equação 7.2.1, o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R(f{=}500Hz) = 13{,}3x\log(m) + 13{,}4 + Dif. = 13{,}3x\log(56{,}25) + 13{,}4 + 6 \approx 43\ dB$$

Como a caixa-de-ar é de grandes dimensões e está totalmente preenchida com material absorvente (lã de rocha), e considerando que um dos painéis se encontra rigidamente desligado da estrutura, admitiu-se, neste caso, uma diferença de isolamento (Dif.) superior à considerada na solução anterior.

1.2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação 7.2.4, a frequência de ressonância do conjunto será:

fr = 65 Hz (frequência fora da zona audível)

1.3) Frequência crítica

De acordo com a equação 7.2.5 e quadro 7.7, a frequência crítica correspondente a cada pano e a respectiva redução sonora serão:

fc1 = 4000/2,5≈ 1600Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB (inferior a 7 dB, porque fc1≠fc2).

fc2 = 1800/1 = 1800 Hz, com uma quebra de isolamento que se estima ser próxima de 6 dB.

1.4) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a figura II.6.

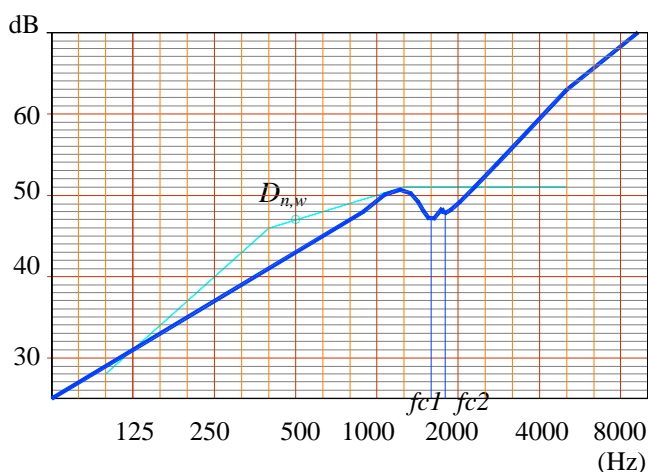



Figura II.6 – Curva de isolamento a sons aéreos previsto numa parede tipo sanduíche com estrutura de aço leve (Par6)

Considerado o traçado apresentado na figura II.6 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o valor global de isolamento a sons de condução aérea é:

$D_{n,w} = 47\ dB$

6.3. Isolamento térmico

Considerando a resistência térmica dos diversos materiais que compõem a solução, bem com as resistências térmicas superficiais interior e exterior, **coeficiente global de transmissão térmica**, calculado através da equação 7.2.6, será:

$$U = \frac{1}{0{,}04 + 2x\frac{0{,}0125}{0{,}35} + \frac{0{,}140}{0{,}040} + \frac{0{,}012}{0{,}20} + \frac{0{,}020}{0{,}040} + \frac{0{,}01}{1{,}15} + 0{,}12} = 0{,}23\ W/m^2.^{o}C$$

6.4. Custo de construção

De acordo com valores de mercado, o custo médio de construção desta solução construtiva ronda os **133,40 €/m²**.

6.5. Índices de comparação

i) Índice de massa (**I_m**)	ii) Índice de energia primária consumida (**I_{PEC}**)
$I_m = \frac{75{,}70}{279{,}07} = 0{,}27$	$I_{PEC} = \frac{170{,}51}{197{,}35} = 0{,}86$
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (**$I_{Dn,w}$**)	iv) Índice de transmissão térmica (**I_U**)
$I_{Dn,w} = \frac{51}{51} = 1{,}00$	$I_U = \frac{0{,}23}{0{,}70} = 0{,}33$
v) Índice de espaço ocupado (**I_{eo}**)	vi) Índice de custo de construção (**I_{cc}**)
$I_{eo} = \frac{19{,}62}{33{,}00} = 0{,}59$	$I_{cc} = \frac{133{,}40}{46{,}68} = 2{,}35$